



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA DOPRAVNÍ

Diplomová práce

Bezpečnostní prostor za A380
Safety area behind the A380

Obor: Provoz a řízení letecké dopravy

Autor: Bc. Tomáš Bartoň

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jakub Kraus, Ph.D.

Rok: 2018

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

děkan

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



K621..... Ústav letecké dopravy

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Tomáš Bartoň

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

N 3710 – PL – Provoz a řízení letecké dopravy

Název tématu (česky): **Bezpečnostní prostor za A380**

Název tématu (anglicky): Safety Area Behind the A380

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- Problematika úplavu
- Rozestupy a klasifikace letadel
- Úplav za A380
- Studie incidentů na základě ADS-B dat
- Návrh bezpečnostního prostoru za A380



- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího diplomové práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: ADS-B Mode S Decoding Guide
ICAO - Předpisy řady L
FAA - Pilot and Air Traffic Controller Guide To Wake Turbulence

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

Datum zadání diplomové práce: **28. července 2017**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **30. listopadu 2018**
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 diplomové práce.

Bc. Tomáš Bartoň
jméno a podpis studenta

V Praze dne11. července 2018

Poděkování:

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi poskytli podklady pro vypracování této práce. Zvláště děkuji panu doc. Ing. Jakubu Krausovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a konzultování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat za konzultace německým odborníkům na atmosférickou fyziku Franku Holzäpfelovi a Judith Rosenow za objasnění vývoje úplavu. Poděkování patří také všem pilotům a řídicím letového provozu, kteří mi poskytli potřebná data a znalosti pro vypracování této práce.

A v neposlední řadě je mou milou povinností poděkovat svým rodičům a blízkým za morální a materiální podporu, které se mi dostávalo po celou dobu studia.

Bc. Tomáš Bartoň

Prohlášení

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

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

V Praze dne: 28.11.2018



.....
Bc. Tomáš Bartoň

Abstrakt

Cílem této diplomové práce je navržení bezpečnostního prostoru pro Airbus A380, kam by neměla ostatní letadla vlétnout, aby nedošlo k nalétnutí turbulence z úplavu. V této práci je výpočtem dokázáno, že úplav letadla A380 zasahuje i do letové hladiny o 1000 stop níže, a tudíž RVSM není dostačující.

Práce se nejdříve zabývá popsáním pravděpodobnostního dvoufázového modelu, který je pro výpočet úplavu použit. Dále jsou zde podrobně popsány všechny související nehody a incidenty, ke kterým došlo v posledních letech, a v poslední řadě je na základě výpočtů a teoretických znalostí navrženo řešení, které by mělo dalším podobným incidentům a nehodám zabránit.

Klíčová slova

úplav, turbulence, víry, airbus, A380, řízení letového provozu, rozstup, bezpečnostní prostor, P2P model

Abstract

The aim of this Master's Thesis is suggestion of the safety area behind the A380, where other airplanes should not fly in, so that they do not encounter wake turbulence. In this work, the calculation shows that wake vortices of the A380 reach the flight level 1000 feet below the A380 flight path, and therefore the RVSM is not sufficient.

The work first deals with the description of the probabilistic two-phase model used for the calculation of the wake turbulence, as well as with all related accidents and incidents that have occurred in recent years, and lastly, based on calculations and theoretical knowledge, a solution is proposed which would had other similar incidents and accidents prevented.

Key words

wake, turbulence, vortices, airbus, A380, air traffic control, separation, safety area, P2P model

Obsah

1. Úvod	9
2. Problematika úplavu.....	10
2.1 Definice a charakteristika úplavu	10
2.2 Výpočet základních parametrů úplavu.....	12
2.2.1 Referenční čas	14
2.2.2 Normalizovaný čas, vzdálenost a rychlost.....	15
2.2.3 Příklad	16
2.3 Pravděpodobnostní dvoufázový model.....	17
2.3.1 Koncept modelu	18
2.3.2 Cirkulace	19
2.3.3 Parametry rozpadu.....	24
2.3.4 Rychlost klesání a parametry víru	28
2.3.5 Pravděpodobný postup úplavu	32
2.4 Efekty úplavu na letadle	33
2.5 Opatření.....	34
3. Rozstupy a klasifikace letadel	36
3.1 L-4444	38
3.2 FAA.....	39
3.3 EUROCONTROL.....	40
4. Úplav za A380	42
4.1 Nehoda Challengeru 604	42
4.1.1 Historie letu	42
4.1.2 Prohlášení posádky Challengeru	44
4.1.3 Prohlášení palubního průvodčí.....	44
4.1.4 Letadla	45
4.1.5 Meteorologické podmínky v době nehody	45
4.1.6 Záznamy letu	46
4.1.7 Informace o výsledku nehody	48
4.1.8 Shrnutí nehody	50
4.2 Incidenty z The Aviation Herald.....	52
4.2.1 Armavia A320 a Fly Emirates A388 nedaleko Tbilisi, 11.1.2009.....	52
4.2.2 Antonov An-124 a Singapore A388 nedaleko Frankfurtu, 10.2.2011.....	52
4.2.3 Air France A320 a Fly Emirates A388 nedaleko Frankfurtu, 14.10.2011.....	53

4.2.4	British Airways A320 a Qantas A388 nedaleko Braunschweig, 16.10.2011	54
4.2.5	Virgin Australia B738 a Fly Emirates A388 nedaleko Bali, 13.9.2012	55
4.3	Případ ČSA a Qatar Airways	56
4.4	Další případy nad územím ČR	58
4.5	Analýza turbulence úplavu od IATA z databáze STEADES 2018.....	58
4.5.1	Nahlášené případy	59
4.5.2	Nová re-kategorizace letadel	60
4.5.3	Statistiky nahlášených případů	61
4.5.4	Klíčové poznatky IATA.....	64
5.	Studie incidentů na základě ADS-B dat	65
5.1	ADS-B data	65
5.2	BDS registr 5.0.....	68
6.	Návrh bezpečnostního prostoru za A380	72
6.1	Vyjádření základních parametrů	72
6.2	Výpočet referenčního času letadla A380-800.....	73
6.3	Výpočet doby trvání a rychlosti klesání indukovaných vírů letadla A380-800	74
6.4	Výpočet úplavu letounu A380 v klidných meteorologických podmínkách.....	75
6.5	Výpočet úplavu letounu A380 v turbulentnějších podmínkách.....	89
6.6	Vliv větru a stručný rozbor nehody CL604 ze 7.1.2017.....	93
6.7	Náčrt bezpečnostního prostoru za A380	94
6.7.1	Bezpečnostní prostor ve stejné letové hladině.....	94
6.7.2	Bezpečnostní prostory v nižší letové hladině.....	97
7.	Závěr.....	100
8.	Seznam obrázků	102
9.	Seznam tabulek.....	105
10.	Seznam zdrojů.....	106
11.	Seznam příloh	109
12.	Přílohy	110

1. Úvod

Turbulence v úplavu byla už od počátku dopravního létání velkým problémem. Docházelo k mnoha případům, kdy se letadlo dostalo do turbulence z úplavu jiného letadla a pro pasažéry a piloty na palubě toto v některých případech představovalo velké nebezpečí.

Postupně se proto začala určovat pravidla pro řízení letového provozu ohledně separace letadel mezi sebou jak na základě časového, tak vzdálenostního rozstupu. Také došlo k rozdělení letadel do kategorií turbulence v úplavu na základě maximální vzletové hmotnosti letadla.

Až do roku 2008 existovaly pouze 3 kategorie turbulence v úplavu: light, medium a heavy.

V roce 2007 společnost Airbus předala svůj první dvoupatrový dopravní letoun Airbus A380-800 letecké společnosti Singapore Airlines. Po několika desetiletích bylo na světě nové největší dopravní letadlo světa, které je schopno dosáhnout kapacity téměř 900 pasažérů s maximální vzletovou hmotností 560 tun a rozpětím téměř 80 metrů. A právě tyto kritéria jsou zásadním problémem.

Airbus A380-800 se kvůli svým aerodynamickým vlastnostem nevešel ani do jedné ze tří kategorií a byla proto zavedena čtvrtá kategorie turbulence v úplavu „super heavy“ s většími rozstupy mezi letadly jak v letových hladinách, tak při vzletu a přiblížení.

V dnešní době se mezi letovými hladinami 290 a 410 aplikuje RVSM (Reduced Vertical Separation Minima) s vertikální separací mezi letadly pouze 1 000 ft. Nicméně úplav letounů A388, A346 a B744 je tak velký, že zasahuje i do této, o 1 000 ft, nižší letové hladiny až 25 NM za letoun. Ostatní úplavy letadel kategorie HEAVY mají podobné charakteristiky a mohou taktéž klesat v určitých atmosférických podmínkách i více než 1 000 ft.

Je zaznamenáno několik případů, kdy právě letadlo o 1 000 ft níže bylo zasaženo úplavem A380. V roce 2017 dokonce došlo k případu, kdy byli cestující vážně zraněni a posádka po znovudosažení kontroly nad letounem musela nouzově přistát na nejbližším vhodném letišti. Po důkladné prohlídce techniků byl letoun označen za neopravitelný a odepsán.

Dosud nebyly zavedeny žádné postupy pro řízení letového provozu, které by takovýmto nebezpečným situacím zamezilo.

Cílem této diplomové práce je navržení bezpečného řešení pro řízení letového provozu v podobě bezpečnostního prostoru za A380, kam by letadla neměla být vůbec vpuštěna.

2. Problematika úplavu

Už od doby, kdy se poprvé člověk vznesl k nebesům na létajícím stroji těžším než vzduch, se začala psát historie fenoménu s létáním spojeným – turbulence v úplavu. V počátcích letectví, kdy bylo letadel relativně málo, a byla lehká, nebylo tomuto jevu věnováno velké pozornosti. Avšak již při pokusech o první lety ve formaci se tehdejší letci dostávali do kontaktu s úplavu a dlouhotrvajícími vrtulovými víry jiných letadel a věděli, jak znesnadňují pilotáž v těsné formaci.

Tyto zkušenosti měli zejména vojenští piloti, kteří museli létat v těsných formacích, které měly přesně předepsaný tvar. S postupem času se letadla stávala většími a těžšími a účinky jejich pohybu ve vzduchové mase znatelnějšími. Formace těžkých bombardérů za druhé světové války měly přesně daný tvar nejenom proto, aby se jednotlivé letouny mohly navzájem krýt, ale také proto, aby byl zajištěn bezpečný rozstup z důvodu tvorby turbulence v úplavu za jednotlivými stroji.

Po druhé světové válce s příchodem velkého rozmachu civilního letectví a s nástupem proudových dopravních letadel bylo nutné turbulenci v úplavu začít věnovat větší pozornost a s přibývajícím stroji na obloze zavést minimální rozstupy mezi nimi.

První vážné problémy s turbulencí v úplavu přišly s nástupem Boeingu 747 do provozu. Následující letadlo muselo proto udržovat určitý, přesně definovaný rozstup za letouny. Rozstupy jsou dle ICAO a FAA založeny na hmotnosti obou letadel (jak prvního letounu, tak letounu, které ho následuje).

I přes tato opatření došlo k řadě nehod způsobených turbulencí v úplavu. V dnešní době moderních technologií se stále rostoucí potřebou zvyšovat kapacity letišť se snažíme minimální rozstupy mezi letadly zkracovat na minimum bezpečného a optimalizovat provoz na stále vytíženějších letištích.

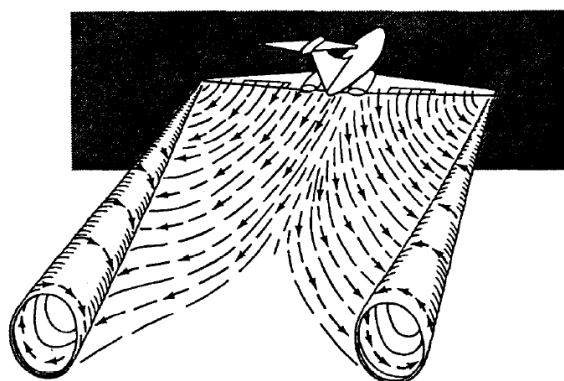
2.1 Definice a charakteristika úplavu

Turbulence v úplavu (přesněji nazývaná indukované víry) vyvolaná letadlem je přirozený důsledek vyvozeného vztaku. Je definována jako turbulence produkovaná letadlem za letu. Dle definice je generována od okamžiku odlepení kola předového podvozku od země při vzletu po jeho opětovné dosednutí při přistání. Ve skutečnosti ji křídlo letadla produkuje vždy, pokud na něm vzniká vztlak.

[1]

Potenciálně nebezpečný jev vzniká při obtékání křídla konečného rozpětí.

Proudění úplavu může být také popsáno „blízkým“ a „vzdáleným“ polem. Blízké pole je oblast kolem křídla a těsně za křídly. Těsně za odtokovou hranou převažuje silné proudění směrem dolů („downwash“), kdežto za winglety na koncích křídel převažuje slabší vzestupné proudění („upwash“). Na odtokové hraně se vlivem odtržení mezní vrstvy objevují víry, které postupně začnou rotovat, na koncích křídel vznikají 2 proti-rotující víry a takto vzniká vírová nestabilita, která se dále projevuje silnou turbulencí v oblasti vzdáleného pole. [1]



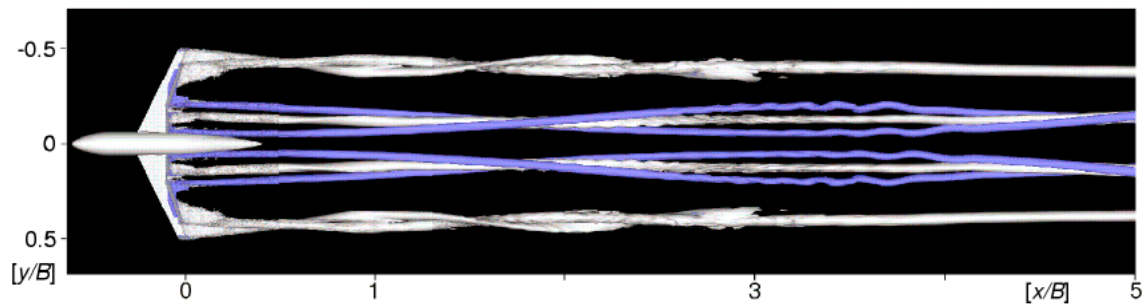
Obrázek 1: Pohled zezadu na letadlo produkující víry úplavu, levý vír rotuje ve směru hodinových ručiček, pravý proti směru hodinových ručiček

Vírové proudění se soustředí okolo jádra, které může mít podle velikosti letounu od několika centimetrů v průměru až po více než metr. U větších letadel může rychlost v jádru dosahovat desítky metrů za sekundu. Jádro je obklopeno vnější oblastí o průměru okolo 30 m, kde rychlost klesá s rostoucí vzdáleností od jádra. Díky vysokým rychlostem rotace se indukované víry poměrně pomalu rozpadají a mohou ovlivnit letadlo, které jimi proletí, i po několika minutách po jejich vytvoření. Průměrná doba trvání těchto vírů je od jedné do tří minut, přičemž největší trvanlivosti dosahují v klidném vzduchu za bezvětří. Doba jejich trvání může také prodloužit nižší hustota vzduchu ve velkých výškách. Po vytvoření vírů většinou dochází s časem k jejich pohybu směrem dolů a do stran od podélné osy letadla, do chvíle, než dojde k jejich rozpadu, nebo v nízkých vrstvách nedosáhnou zemského povrchu. Jejich pohyb samozřejmě ovlivňuje i vítr, který je může snášet mimo trajektorii pohybu letounu. [2]

Síla vírů úplavu závisí na **vztlaku**, **rychlosti** letadla a také na **tvary křídla**, zejména na tvaru jeho zakončení a konfiguraci vztlakové mechanizace. Nejsilnější turbulenci v úplavu produkuje těžký letoun letící malou rychlostí v čisté konfiguraci na velkém úhlu náběhu. Letadla s menším rozpětím křídel produkují silnější víry než letadla s větším rozpětím při stejné hmotnosti, příkladem je Boeing 757, který má poměrně malé rozpětí křídel a velké motory v poměru ke zbytku letadla, proto

produkuje turbulenci v úplavu intenzivní jako mnohem těžší stroj. Potřebný vztlak v rovnoměrném přímočarém letu musí být roven tíze letadla, a proto je přímo závislý na hmotnosti. [2]

Na obrázku 2 je zobrazen pohled zespod na nasimulované blízké úplavové pole za letadlem ve vysoko-vztlakové přistávací konfiguraci. Jsou zde zachycené úplavové víry z konců křídel i úplavové víry z vnějších konců vysunutých klapek. Z obrázku je patrné, že víry za pravým koncem křídla rotují proti směru hodinových ručiček a víry za levým koncem křídla rotují po směru hodinových ručiček.



Obrázek 2: Pohled zespod na simulaci letadla a jeho úplavu v blízkém poli do pětinasobné vzdálenosti jeho rozpětí "B". [3].

2.2 Výpočet základních parametrů úplavu

Vývoj úplavu je často charakterizován *vzdáleností* x od letadla a *rozpětím* B daného letounu. Zde bude místo toho použit k popisu vývoje úplavu *nedimenzionální čas* $t^* = t/t_0$. Referenční čas t_0 , který je definovaný níže, je vhodnější pro tento popis než měřítko délky, protože umožňuje porovnat různé fáze letu (let v letové hladině, přistání, vzlet), různé experimenty v aerodynamickém tunelu a CFD simulace.

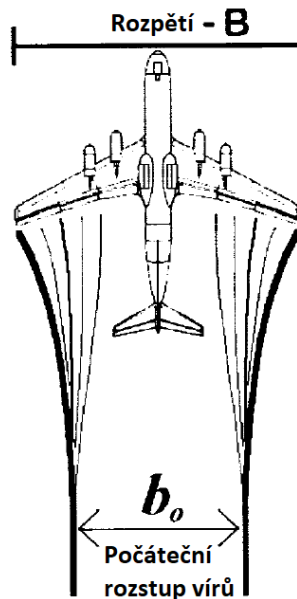
Tabulka 1 zobrazuje všechny příslušné parametry a jejich definice zde použité. *Počáteční rozstup vírů* b_0 (po rotaci – „roll-up“ – vysvětleno později) je vždy vypočítán *rozpětím křídla* B a *parametrem* s , kde tento parametr s je *faktor zatížení od kořene křídla po jeho konec* (tzv. „spanwise load factor“) a závisí na *lokální cirkulaci* (síle úplavu) $\Gamma(y)$ [1]:

$$s = \frac{2}{B} \int_0^{\frac{B}{2}} \frac{\Gamma(y)}{\Gamma_0} dy \quad (1)$$

Parametry letadla a úplavu	Aircraft and wake parameters	Značka (jednotka)
Hmotnost letadla	Mass of aircraft	m (kg)
Rozpětí křídel	Wing span	B (m)
Plocha křídla	Wing area	A (m ²)
Rychlost letadla, rychlost proudění v aerodynamickém tunelu	Aircraft speed, free stream velocity in wind tunnel	v (m/s)
Tětiva profilu	Local chord	c(y) (m)
Součinitel vztlaku (lokální)	Lift coefficient (local)	c _l (y) (-)
Součinitel vztlaku (globální)	Lift coefficient (global)	C _L (-)
Štíhlost křídla	Wing aspect ratio	A _R = B ² /A (-)
Faktor zatížení křídla	Spanwise load factor	s (-)
Gravitační zrychlení	Gravitational acceleration	g (m/s ²)
Hustota vzduchu	Air density	ρ (kg/m ³)
Počáteční cirkulace	Root circulation	Γ ₀ (m ² /s)
Průměrná cirkulace poloměrů vírů 5-15 m	Averaged circulation over circles with radii from 5-15 m	Γ ₅₋₁₅ (m ² /s)
Poloměr jádra víru	Vortex core radius	r _c (m)
Vnější poloměr víru	Outer vortex radius	r _v (m)
Referenční délka (počáteční rozstup vírů)	Reference length, initial vortex spacing	b ₀ = s · B (m)
Referenční rychlost (rychlost klesání vírů)	Reference velocity, descend speed of vortex pair	w ₀ = Γ ₀ / (2πb ₀) (m/s)
Referenční čas	Reference time	t ₀ = b ₀ / w ₀ (s)
Vzdálenost za letadlem	Distance behind aircraft	x (m)
Doba po průletu	Time after fly-by	t (s)
Normalizovaná délka, obvykle používaná	Normalized length, usually used	x' = x/B (-)
Normalizovaná délka	Normalized length	x* = x/b ₀ = x' / s (-)
Normalizovaný čas, doporučený	Normalized time, recommended	t* = t/t ₀ (-)
Normalizovaná rychlost	Normalized velocity	v* = V/w ₀ (-)
Brunt-Väisälä frekvence	Brunt-Väisälä frequency	N (s ⁻¹)
Stupeň rozpadu víru	Eddy dissipation rate	ε (m ² /s ³)
Tangenciální rychlost	Tangential velocity	v _θ (m/s)

Tabulka 1: Parametry letadla a úplavu

Z častých výpočtů bylo zjištěno, že parametr s se ve většině případů blíží k $\pi/4$ ať už pro elipticky zatížená křídla nebo pro křídla, která nejsou elipticky zatížená, například s vysoko-vztlakovou konfigurací [1].



Obrázek 3: Rozstup vírů elipticky zatíženého křídla [4]

2.2.1 Referenční čas

Turbulence v úplavu formuje za křídly pár protirotujících vírů, tento proces se nazývá *rotace* („*roll-up*“). Proces rotace je považován za dokončený tehdy, když pár protirotujících vírů je zformován a má konstantní míru klesání i vzdálenost mezi jádry vírů. Fáze rotace a formování vírů je ukončena ale až po určité době t_0 nazývanou *referenční čas*. [1]

Tento referenční čas lze odvodit následujícím vzorcem:

$$t_0 = 2\pi \frac{b_0^2}{\Gamma_0} = 2\pi s^2 \frac{B^2}{\Gamma_0} \quad (2)$$

Můžeme vidět, že rovnice zahrnuje, jak rozstup vírů (rozpětí křídla), tak cirkulaci (sílu úplavu). Letoun s rychlostí v ; součinitelem vztlaku C_L ; štíhlostí křídla A_R a rozpětím B má vztlak, který se rovná toku hybnosti jeho úplavu [1]:

$$\frac{\rho C_L}{2A_R} B^2 v^2 = \rho v b_0 \Gamma_0 \quad (3)$$

A tudíž můžeme vyjádřit *cirkulaci* Γ_0 :

$$\Gamma_0 = \frac{vBC_L}{2sA_R} \quad (4)$$

Když jsou síly působící na letadlo v rovnováze, vztlak letadla a tok vertikální hybnosti úplavu se rovnají *hmotnosti letadla* m a Γ_0 může pak být získán [1]:

$$\Gamma_0 = \frac{mg}{\rho s B v} \quad (5)$$

Počáteční cirkulace Γ_0 představuje cirkulaci úplavu (sílu rotace vírů) poloviny letadla (1 víru) ve vzdáleném poli za trupem, ocasními plochami atd. [1]

Z již uvedených rovnic výše můžeme vyjádřit *referenční čas* t_0 jako:

$$t_0 = 4\pi s^3 A_R \frac{B}{C_L v} \quad (6)$$

a je vidět, že parametr *faktoru zatížení* s má na referenční čas velký vliv.

2.2.2 Normalizovaný čas, vzdálenost a rychlost

Z tabulky a z předešlých vzorců můžeme vyjádřit vztah mezi *referenční rychlostí* (*rychlost klesání obou úplavových vírů*) w_0 a *normalizovanou rychlostí* v^* letu jako [1]:

$$w_0 = \frac{b_0}{t_0} = \frac{sB}{t_0} = \frac{C_L v}{4\pi s^2 A_R} \quad (7)$$

a

$$v^* = \frac{v}{w_0} = 4\pi s^2 \frac{A_R}{C_L} \quad (8)$$

Za účelem stanovení vztahu mezi časem a vzdáleností, předpokládáme konstantní rychlost letu nebo větru tak, že: $t = x/V$. To vede k rovnici pro *normalizovaný čas* t^* jako [1]:

$$t^* = \frac{x}{vt_0} = \frac{x^*}{v^*} = \frac{x'}{sv^*} = x^* \frac{C_L}{4\pi s^2 A_R} \quad (9)$$

Výše uvedená rovnice ukazuje, že vztah *ne-dimensionální délky* $x^* = x/b_0$ k *normalizovanému času* t^* závisí na veličině v^* . Jinými slovy, pro určení stáří vírů, často používaná normalizovaná délka $x' = x/B = sx^*$ může být jednoznačně použita pro různé experimenty (zejména v různých zařízeních s různými modely) pouze tehdy, když je $s^3 \frac{A_R}{C_L}$ konstantní. Pro popis stáří úplavu letounu se tudíž doporučuje používat t^* místo x' . Použití t^* se stává nezbytnou podmínkou při porovnávání dat z různých letadel (a modelů letadel) v různých fázích letu (let v hladině, přistání, vzlet) s různými letovými charakteristikami.

Komerční letadla dosahují hodnot štíhlostí křídel mezi 7 a 9. Extrémně dlouho-přetrvávající životnost vírů byla i zaznamenána za stíhačkami, jejichž štíhlost křídla dosahuje hodnoty 3. [1]

2.2.3 Příklad

Nyní použijeme letové parametry Airbusu A340 a Boeingu B747, abychom na příkladu porovnali výsledky stáří úplavu jako t^* a x' v tabulce 2. Pro toto porovnání použijeme $s = \frac{\pi}{4}$.

Referenční čas t_0 je rozdílný o určitou hodnotu mezi modelem A340 a reálným letadlem A340. Nicméně, na základě správného zmenšení měřítka rozpětí je staří úplavu t^* stejné, protože stejný je součinitel vztlaku C_L i štíhlost křídla A_R .

Když nyní porovnáme A340 s B747, je vidět z tabulky níže, že A340 je celkově menší než B747, ale má větší normalizovanou vzdálenost x' . V přistávací konfiguraci má A340 o 22 % menší cirkulaci a o 12 % větší referenční čas než B747. Tudíž můžeme říct, že úplav letounu A340 je o 4-5 % mladší ve vzdálenostech 2.5, 3 nebo 6 námořních mil.

Tabulka níže ukazuje, že letadlo letící v letové hladině má mnohem mladší úplav (silnější) v pevně definovaných vzdálenostech kvůli menšímu součiniteli vztlaku, než přistávací letadlo ve vysoko-vztlakové konfiguraci.

	A340 model	A340 landing	B747 cruise	B747 landing
m (kg)	—	187500	273000	273000
B (m)	2.0	60.3	64.4	64.4
v (m/s)	60.0	75.0	240.0	80.0
A_R	9.26	9.26	7.0	7.0
C_L	1.386	1.386	0.448	1.178
Γ_0 (m ² /s)	11.4	431.0	630.0	552.0
t_0 (s)	1.36	32.7	25.4	29.1
v^* (—)	51.8	51.8	121.1	46.1
2.5 nm = 4630 m				
x' (—)	77 ^a	77	72	72
t^* (—)	1.9	1.9	0.76	2.0
3 nm = 5556 m				
x' (—)	92 ^a	92	86	86
t^* (—)	2.3	2.3	0.91	2.4
6 nm = 11112 m				
x' (—)	184 ^a	184	172	172
t^* (—)	4.6	4.6	1.8	4.8

^aModel A340 je podle příslušného měřítka zmenšený a tím jsou změněny i příslušné parametry, např.: rozpětí modelu. X/B je konstantní jak pro reálný A340, tak pro model A340. Pro reálná letadla v měřítku 1:1 byly použity normální hodnoty (maximální vzletová hmotnost a hustota vzduchu v příslušné výšce)

Tabulka 2: Parametry a referenční čas pro letadla A340-300 a B747-400 s parametrem $s=\pi/4$ [1]

Je třeba zdůraznit, že pro všechny případy byl použit parametr s jako $\pi/4$. Snížení hodnoty s , například pro elipticky zatížená křídla s menším rozstupem úplavových vírů b_0 , zvýší cirkulaci Γ_0 pouze lineárně (viz rovnice 4), ale sníží hodnotu t_0 (viz rovnice 6), jelikož je zde faktor s umocněn na třetí.

Z naměřených LES (large-eddy simulation) dat je možné pozorovat, že cirkulace úplavu klesá (rozpadá se) o 20-40 % z původní hodnoty v době mezi $4t_0$ a $6t_0$, bez ohledu na hodnotu t_0 (alespoň pro dopravní letadla s velkou štíhlostí křídla). Tudíž menší t_0 automaticky vyvodí **větší staří úplavu**, a tudíž **slabší úplav** v definovaných vzdálenostech [1].

2.3 Pravděpodobnostní dvoufázový model

Pro popis chování úplavu v atmosféře za letadlem A380 bude použit dvoufázový model P2P („Probabilistic two-phase model“) od Franka Holzäpfela, který se zabývá meteorologií a atmosférickou fyzikou. Frank Holzäpfel zpracoval mnoho článků týkající se proudění v atmosféře a chování úplavu za dopravním letadlem. Výše uvedené vzorce a postupy v předchozí kapitole jsou taktéž od něj.

Tento model je založen na velkém množství pozorování a simulací chování úplavu v určitých atmosférických podmínkách. Byly použity LES data („large-eddy simulation“).

Z LES dat je možné vypořadovat, že rozpad vírů prochází dvěma fázemi. První fáze je **fáze difúze** a poté přichází **fáze rychlého rozpadu**. [5]

Z obrázku 15 v další podkapitole je vidět, že sestup úplavových vírů není dokonalou lineární funkcí síly úplavu, zejména kvůli druhé fázi rychlého rozpadu, kdy sestupná rychlost vírů klesá exponenciálně se silou úplavu. Model také počítá s vlivem větru, turbulence, stabilním rozvrstvením a s vlivem přízemního efektu, který ale v této diplomové práci není třeba uvažovat.

Bohužel nicméně ani tento model nikdy nepředpoví chování úplavu za letadlem se stoprocentní přesností! [5]

2.3.1 Koncept modelu

P2P je navržen tak, aby zahrnoval co nejvíce znalostí získaných z experimentálního i numerického výzkumu budícího víru se zaměřením na provozní potřeby. K tomuto účelu modelový koncept obsahuje několik prvků popsaných níže:

Za prvé, na rozdíl od většiny ostatních modelů, P2P používá dobře definovanou a experimentálně přístupnou *definici síly víru*.

Cirkulace úplavového páru vírů hodně závisí na způsobu jejich zhodnocení. P2P používá cirkulaci I_{5-15}^r , která je zprůměrovaná z kružnic o poloměru od 5 do 15 m z několika následujících důvodů [5]:

1. Odhady počáteční cirkulace mohou být velmi obtížné pro dvojici úplavových vírů, které se vyvíjejí v atmosféře. To je případ měření a simulace. Pro jednodušší výpočty je zde uplatňován horní integrační limit $r = 15$ m u větších letadel, který vylučuje, že by se měly sousední víry nějakým způsobem navzájem ovlivňovat nebo by byly ovlivněny okolní turbulencí.
2. Zprůměrování cirkulace v intervalu poloměrů snižuje rozptyl v turbulentních vírech a umožňuje odhadnout rozpad vírů.
3. Malé poloměry, které nejsou spolehlivě měřitelné metodou dálkového měření LIDAR (*“Light Detection And Ranging”*), jsou vyloučeny.
4. Vzhledem k tomu, že konečným cílem P2P je předvídat chování víru, díky kterému lze stanovit rozstupy mezi po sobě letícími letadly, je použita definice cirkulace, která dobře koreluje s účinky potenciálních letadel zasažených úplavem. Je dobré zdůraznit, že I_{5-15}^r se vypočítává pouze ze složek rychlosti, které jsou kolmé na směr letu nebo od odpovídající vířivosti, bez ohledu na skutečnou orientaci vírové osy. To znamená, že rozsáhlé deformace nebo vznik nestability „Crow“ (fáze, kdy se víry z konců křídel setkají s kondenzační stopou motorů) mohou výrazně snížit hodnotu I_{5-15}^r .

Za druhé, P2P model je založen na *rovnících pro rozvoj vírů*. Protože neexistuje žádné řešení pro vývoj turbulentních vírových párů, hydrodynamická báze P2P se opírá o rovnici, která popisuje cirkulační vývoj rozkládajícího potenciálního víru. [5]

$$\frac{\Gamma(r,t)}{\Gamma_0} = 1 - e^{\left(\frac{-r^2}{4\nu t}\right)} \quad (10)$$

Rovnice výše představuje analytické řešení Navier-Stokesovy rovnice pro nestacionární, rovinný, rotující tok. V P2P je tento vztah rozšířen a přizpůsoben LES výsledkům různých skupin, které popisují rozpad a klesání víru.

Za třetí, P2P model obsahuje *pravděpodobnostní složky*, které souvisí s proměnlivým chováním úplavu, které jsou způsobené turbulencí a vnějšími podmínkami atmosféry. [5]

Výstup P2P modelu se skládá z horní a dolní hranice pro polohu vírů a jejich cirkulaci.

Konečným cílem je spolehlivě určit pravděpodobnost, s jakou se skutečná evoluce vírů shoduje s předpovědí. K tomuto účelu musí být P2P aplikován na co nejvíce dostupných dat. [5]

Bohužel kvůli nedostatku zdrojů a dat, bude tento model v této diplomové práci použit pouze na známých případech popsanych v dalších kapitolách.

2.3.2 Cirkulace

Můžeme říci, že vývoj Γ_{5-15}^* může být rozdělen do dvou fází rozpadu.

První fáze se nazývá **fáze difúze**. Normalizovaná cirkulace může být matematicky spočítaná jako [5]:

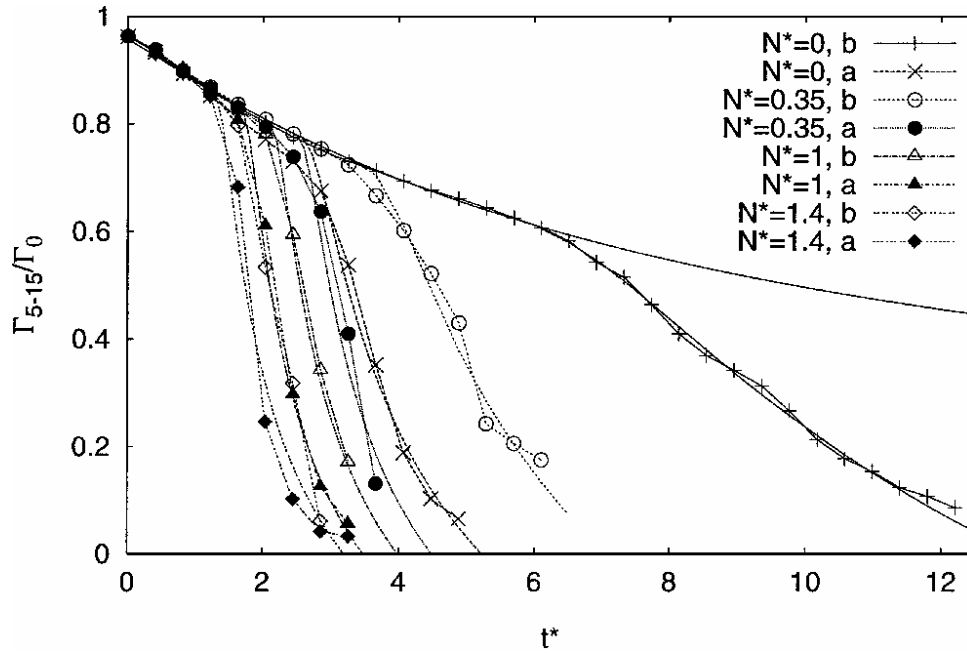
$$\Gamma_{5-15}^*(t^*) = \frac{1}{11} \sum_{r=5m}^{15m} A - \exp\left(\frac{-r^{*2}}{4\nu_1^*(t^* - T_1^*)}\right) \quad (11)$$

kde ν_1 je kinematická viskozita. Ve vzorci je možno vidět konstantu A a T_1^* , kde $-T_1^*$ symbolizuje stáří úplavu od doby $t^*=0$. Konstanta A pouze upravuje $\Gamma_{5-15}^*(t^* = 0)$. [5]

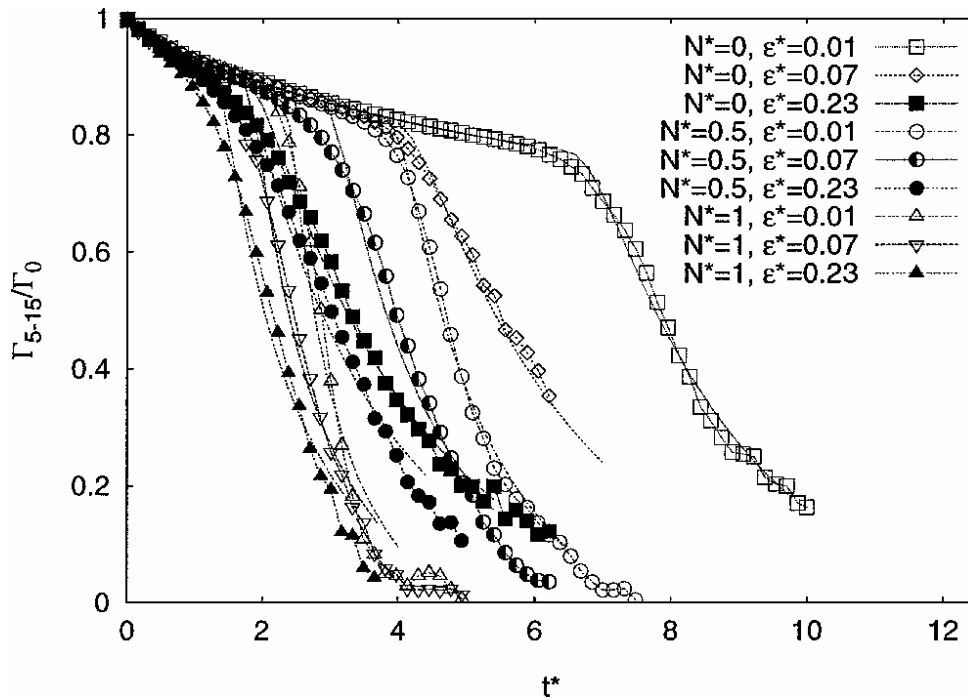
Kvůli zachování jednoduchosti je vynecháno zprůměrování poloměrů z rovnice 11, z čehož dostáváme:

$$\Gamma_{5-15}^*(t^*) = A - \exp\left(\frac{-R^{*2}}{v_1^*(t^* - T_1^*)}\right) \quad (12)$$

Průměrný poloměr R^* odpovídá přibližně průměrné hodnotě 10 m intervalu 5-15 m. V rámci R^{*2} je zahrnuta i 1/4 z rovnice 11. [5]



Obrázek 4: Cirkulace ze simulací LES a odpovídající výsledky P2P modelu pro různé scénáře turbulencí a stupně teplotního zvrstvení [5]



Obrázek 5: Cirkulace z jiné simulace LES od Proctora a Switzera a odpovídající výsledky P2P modelu pro různé scénáře turbulencí a stupně teplotního zvrstvení s parametrem ε [5]

Druhá fáze se nazývá **fáze rychlého rozpadu**, kde se víry deformují rychleji v závislosti na BV frekvenci N^* (vysvětleno později), a které nemusí být ani v ose směru letu letadla. Toto všechno ve fázi rychlého rozpadu způsobuje, jak je možné vidět z názvu, prudký pokles síly vírů úplavu Γ_{5-15}^* .

Samozřejmě v praxi se mohou výsledky P2P modelu poněkud trochu lišit, nicméně je předpokládáno, že vývoj vírů odpovídá numerickým hodnotám. Proto můžeme matematicky vyjádřit sílu úplavu ve druhé fázi jako [5]:

$$\Gamma_{5-15}^*(t^*) = A - \exp\left(\frac{-R^{*2}}{v_1^*(t^* - T_1^*)}\right) - \exp\left(\frac{-R^{*2}}{v_2^*(t^* - T_2^*)}\right) \quad (13)$$

kde počátek rychlého rozpadu T_2^* a „efektní“ viskozita v_2 závisí na meteorologických parametrech. [5]

Zvrstvení neboli stratifikace je charakterizováno **Brunt-Väisälä frekvencí** jako [5]:

$$N = \sqrt{\frac{g}{\theta} \frac{d\theta}{dz}} \quad (14)$$

kde g je gravitační zrychlení $9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, θ je *okolní potenciální teplota* a z je výška.

Je to frekvence lokálních vertikálních oscilací malé amplitudy buzených vztlakem, a navíc nejvyšší možná frekvence, kterou ve vztlakem buzených stratifikovaných prouděních fluktuace mohou mít. Pro takzvané stabilní zvrstvení je frekvence kladná, zatímco v nestabilním případě, kdy frekvence dosahuje záporných hodnot, je frekvence imaginární a takové proudění se vyvíjí do stavu se stabilním zvrstvením. Frekvence je nulová v klidném (neutrálním) ovzduší. [6]

Potenciální teplota vzduchu θ je teplota, kterou by měly částice ideálního plynu, kdyby byly adiabaticky přivedeny z výšky o tlaku p do výšky, kde je referenční tlak p_r

Vztah pro potenciální teplotu je:

$$\theta = T \left(\frac{p_r}{p} \right)^{1-\frac{1}{\gamma}} \quad (15)$$

kde T je aktuální absolutní teplota (v K) vzduchu. Konstanta γ je poměr specifických tepel c_p/c_v . Teorie ideálního plynu dává pro vzduch předpověď $\gamma=1,4$. [6]

Normalizovaná Brunt-Väisälä frekvence je pouze vynásobená referenčním časem: $N^* = N \cdot t_0$. [1]

V LES simulacích od Holzäpfela se rozlišuje mezi dvěma případy **a** a **b** (obsaženo i později v grafech) [5]:

- a) Víry se rozvíjejí v anizotropní atmosférické turbulenci s rychlostmi $0,38 \text{ m/s}$ v horizontálním směru a $0,21 \text{ m/s}$ vertikálním směrem
- b) Pouze letadlem způsobené turbulence ovlivňují víry

Proctor a Switzer charakterizovali turbulenci pomocí **normalizovaného stupně rozpadu víru** ε^* („*eddy dissipation rate = EDR*“) [5]:

$$\varepsilon^* = (\varepsilon b_0)^{\frac{1}{3}} / w_0 \quad (16)$$

Menší stupeň rozpadu první fáze difúze od Proctora a Switzera (obrázek 5) je z větší části způsoben hlavně Richardsonovým číslem korekce pro rotační efekty, který snižuje difúzi v oblasti jader vírů.

(Rotační číslo Richardson, Ri , představuje rotační účinek na turbulenci a je analogické s účinkem zvrstvení).

Čím silnější je turbulence a teplotní zvrstvení, tím dříve se jednotlivé křivky v grafu odtrhnou od běžného vývoje ve fázi difúze a začnou fázi rychlého rozpadu (viz obrázek 4 a 5).

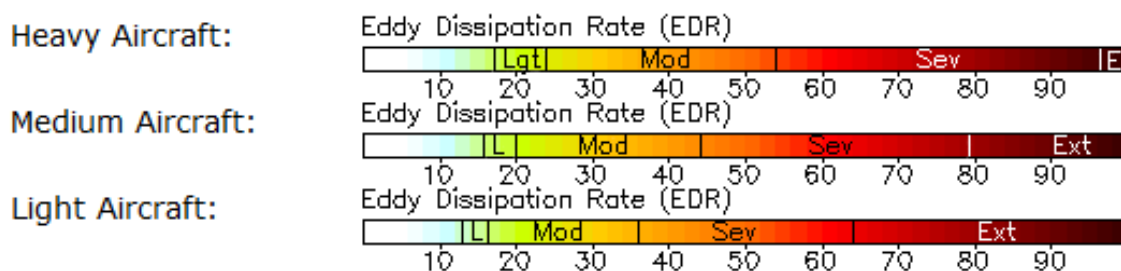
Účinky turbulence způsobené letadlem (případ b) se zhruba shodují s účinkem okolní turbulence s normalizovaným stupněm rozpadu $\epsilon^* = 0,01$. [5]

EDR

V následujícím odstavci bude stručně vysvětleno, co si můžeme pod hodnotou EDR představit.

Stupeň rozpadu víru (EDR) je jednoduše řečeno měřítko turbulentního stavu atmosféry.

Z obrázku níže lze vidět rozsah hodnot EDR pro 3 různé kategorie letadel. Čím těžší letadlo, tím snáší turbulentní stav lépe.



Obrázek 6: Stupnice EDR pro lehké, středně těžké a těžké letouny [7]

Příklad:

Jestliže si z rovnice 16 vyjádříme ϵ a dosadíme si za normalizovaný stupeň rozpadu víru například hodnotu $\epsilon^* = 0,23$ (z obr. 5); $b_0 = 62,64$ m; $w_0 = 2,17$ m/s (hodnoty pro A380 spočítané později), dostaneme hodnotu $\epsilon = 0,00198477$ m²/s³.

Pro snadnější zobrazení v barevném měřítku jsou hodnoty ϵ umocněné na 1/3 a vynásobené 100.

Dostáváme hodnotu $EDR = 0,00198477^{\frac{1}{3}} * 100 = 12,57$ m²s³. [7]

Z tabulky vidíme, že $EDR = 12,57$ m²s³ pro těžký letoun A380 nepředstavuje za těchto podmínek nebezpečí.

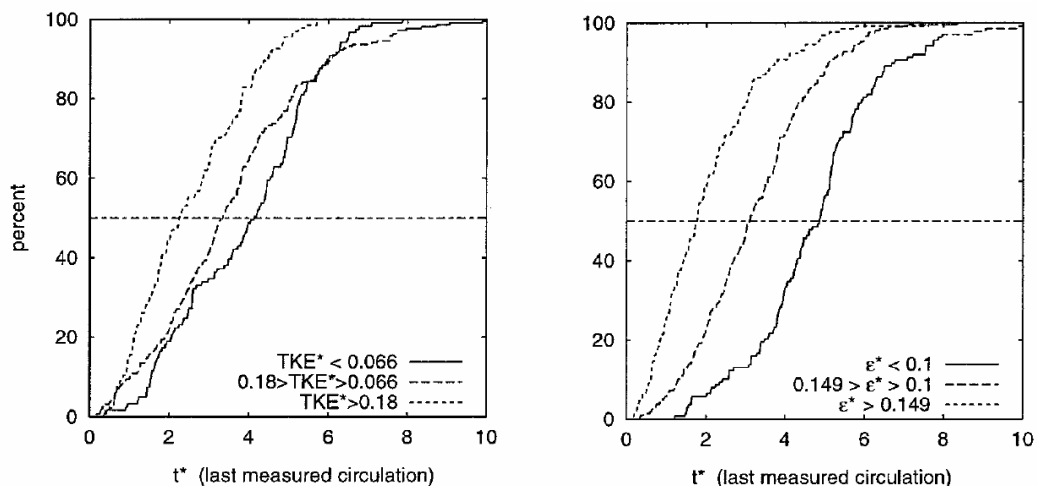
V níže uvedené tabulce jsou uvedeny obecně intenzity turbulence pro jednotlivé hraniční hodnoty EDR:

INTENZITA TURBULENCE	EDR (m^2/s^3)
Intenzivní	$1,50 \cdot 10^{-2}$
Silná	$7,17 \cdot 10^{-3}$
Středně silná	$3,02 \cdot 10^{-3}$
Střední	$1,35 \cdot 10^{-3}$
Slabá	$4,00 \cdot 10^{-5}$
Velmi slabá	$1,00 \cdot 10^{-7}$

Tabulka 3: Rozdělení intenzity turbulence v závislosti na hodnotě EDR [8]

2.3.3 Parametry rozpadu

Pro představu je zde stručně vysvětleno, jaké všechny veličiny mají vliv na rozpad úplavových vírů. Hodnoty T_2^* a v_2^* musí být určeny jako funkce meteorologických parametrů. V podstatě může být vliv turbulence parametrizován na základě turbulentní kinetické energie (TKE) nebo alternativně stupně rozpadu víru (EDR). [5] Analýza 525 měření úplavu Memphiské databáze hodnotí potenciál příslušných veličin. Obrázek 7 ukazuje kumulativní rozdělení momentu v čase posledního měření cirkulace pomocí metody LIDAR pro tři různé režimy turbulence. Předpokládá se, že tento okamžik v čase koreluje s dlouhou životností vírů. TKE kritérium ukázané na obr. 7 vlevo odděluje dlouhou životnost víru v nízko a středně turbulentním režimu nedostatečně, kdežto korelace trvání a ϵ^* znázorněné na obr. 7 vpravo je mnohem výraznější. [5]

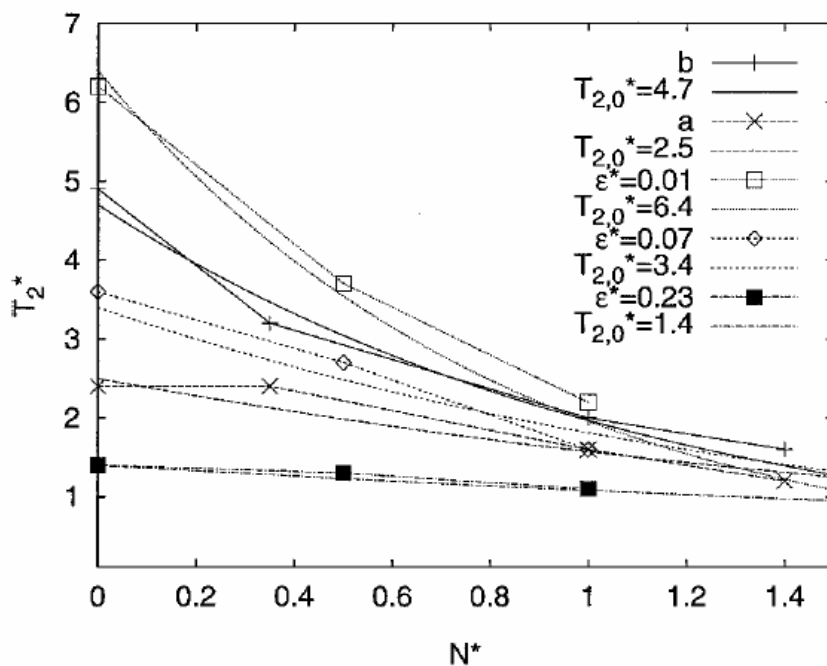


Obrázek 7: Kumulativní distribuce času posledního měření lidar z 525 případů pro tři různé třídy turbulence charakterizované normalizovanou TKE (vlevo) a normalizovaným stupněm rozpadu víru ϵ^* (vpravo) [5]

Tento výsledek potvrzuje předpoklad, že intenzita atmosférických výkyvů, která ovlivňuje rozpad vírů, může být dobře charakterizována pomocí ϵ^* .

V P2P modelu je parametrizace vlivu turbulence založena na ϵ^* , ačkoliv je velmi obtížné odvodit ϵ^* z měření v provozním prostředí. [5]

Obrázek 8 ukazuje závislost doby počátku rychlého rozpadu T_2^* na normalizovanou BV frekvenci N^* - pro různé úrovně turbulence. Zvýšené hodnoty stratifikace (zvrstvení) i turbulence snižují hodnotu T_2^* . [5]



Obrázek 8: Parametr rozpadu, T_2^* , jako funkce zvrstvení a turbulence odpovídající rovnici 17. [5]

Je dobré si povšimnout, že počátek rychlého rozpadu T_2^* dobře koreluje s vizuálně stanovenými inflexními body T_{5-15}^* křivek (obr. 4 a 5).

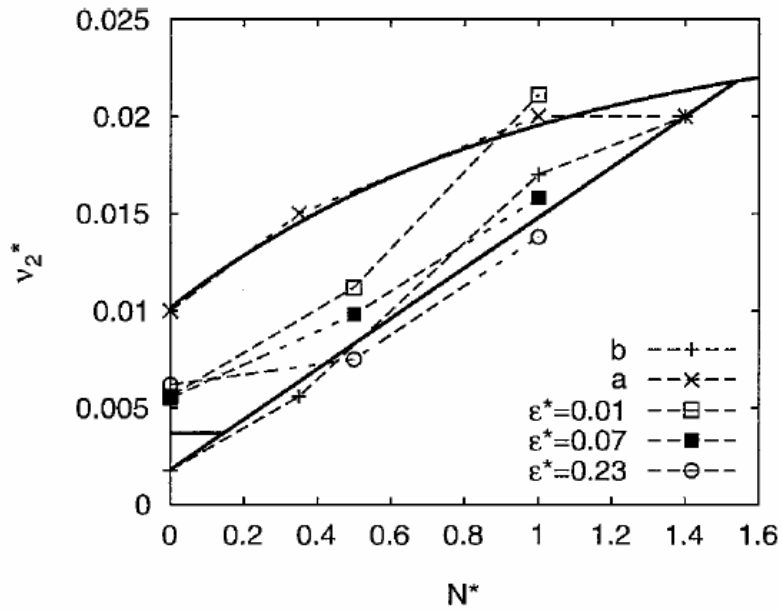
Skupina křivek z obrázku výše, které odpovídají specifickým úrovním turbulence, odpovídají vyjádření T_2^* jako [5]:

$$T_2^* = T_{2,0}^* \exp(-0.185 T_{2,0}^* N^*) \quad (17)$$

kde úroveň turbulence je charakterizována časovou konstantou pro rychlý rozpad v neutrálně zvrstvené atmosféře, $T_{2,0}^* = T_2^* (N^* = 0)$.

Jestliže bychom chtěli znát vztah mezi $T_{2,0}^*$ a ε^* , bude nelineární křivka vypadat podobně jako obrázek 8, ale s prudkým poklesem $T_{2,0}^*$ při nízkých hodnotách ε^* . [5]

Na obrázku 9 je zobrazena závislost mezi normalizovanou kinematickou viskozitou ν_2^* a N^* . Je zde zřejmé, že korelace hodnot ν_2^* s turbulence a zvrstvením je menší, než u T_2^* .



Obrázek 9: Parametr rozpadu, v_2^* , jako funkce stratifikace pro různé úrovně turbulence dle LES dat (plné čáry znázorňují horní a dolní předpokládané hranice dle rovnic 18 a 19) [5]

V LES datech je nejsilnější dopad turbulence v neutrálně zvrstvené atmosféře.

Kinematická viskozita v_2^* je parametrizována pouze jako funkce N^* a nejistota vlivu turbulence je vzata v úvahu stanovením horní a spodní hranice v_2^* pro příslušné N^* . [5]

Horní hranice je vyjádřena jako:

$$v_{2,u}^* = 0.025 [1 - \exp(-N^* - 0.52)] \quad (18)$$

A dolní hranice:

$$v_{2,l}^* = 0.0018 + 0.013 N^* \quad (19)$$

Mimo jiné, hranice $v_{2,l}^* = 0.0037$ je zavedena tehdy, když je normalizovaný stupeň rozpadu $\varepsilon^* > 0.01$, aby se zabránilo extrémně dlouhé životnosti vírů ve slabě turbulentním prostředí. Hodnoty pod touto hranicí jsou používány v podstatě pouze pro naprosto klidné ovzduší. [5]

2.3.4 Rychlost klesání a parametry víru

LES simulace a další pozorování ukazují, že Γ_{5-15}^* se může podstatně snížit bez značného vlivu na rychlost sestupu (viz obrázek 11). To může být jednoduše chápáno tak, že tangenciální rychlost (rychlost na „konci poloměru“) potenciálních vírů se snižuje pomaleji při větších rozpětích u větších letadel ($b > 15\text{m}$), než při poloměrech $r = \langle 5\text{m}; 15\text{m} \rangle$, které jsou použity pro vyjádření Γ_{5-15}^* . [5]

Jinými slovy, Frank Holzäpfel se na základě LES simulací snažil odhadnout průměrnou rychlost klesání úplavových vírů všech rozptýlených hodnot cirkulace v rozmezí 5 až 15 m od středu víru. [9]

Proto byla potřeba vytvořit vztah a potenciální víry, které upraví sestup vírů tak, aby odpovídaly naměřeným datům z LES simulací. Lineární vztah mezi w^* a Γ_{5-15}^* by nedával správné výsledky. [5, 10]

Z toho důvodu byly zavedeny hodnoty *ideální rozstup vírů “b” a ideální poloměr jádra víru “r_c”* (vysvětleno později). [5]

Za předpokladu, že se úplavové víry rozpadají v souladu s rychlostními profily potenciálního víru, sestupná rychlost úplavových vírů může být spočítána jako funkce ideálního rozstupu vírů a jejich ideálních poloměrů následovně [5]:

$$w^* = 1 - \exp(-1.257b^2/r_c^2) \quad (20)$$

Vztah mezi sestupnou rychlostí w^* a Γ_{5-15}^* je poté implicitně vyjádřen skrz ideální poloměr jádra víru r_c jako [5]:

$$\Gamma_{5-15}^* = \frac{1}{11} \sum_{r=5\text{ m}}^{15\text{ m}} 1 - \exp\left(\frac{-1.257r^2}{r_c^2}\right) \quad (21)$$

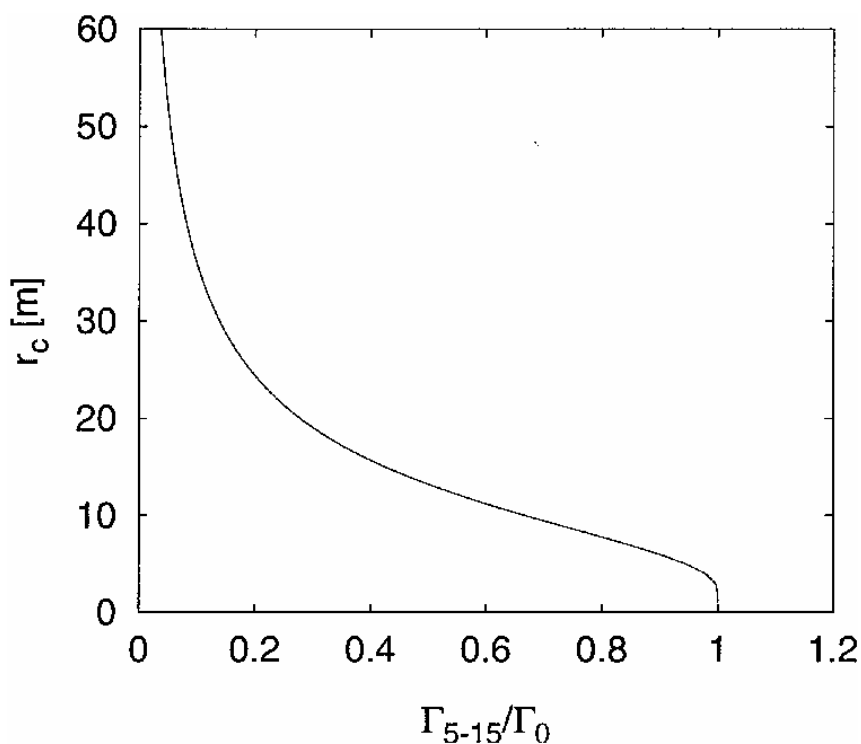
Obrázek 10 graficky znázorňuje rovnici 21. Obrázek 11 zase znázorňuje vztah mezi rychlostí klesání w^* a normalizovanou cirkulací Γ_{5-15}^* (rovnice 20 a 21) pro několik různých ideálních rozstupů vírů b .

U letadel s malým rozstupem vírů má i malá změna cirkulace Γ_{5-15}^* vliv na rychlost klesání vírů, kdežto u větších letadel s velkým rozstupem vírů bude rychlost klesání klesat až při nízkých hodnotách Γ_{5-15}^* . Z obrázků níže je vidět, že rychlost klesání se začíná snižovat v momentě, kdy poloměr jádra vírů dosáhne takových hodnot, že mezi nimi není žádný rozstup (začínají se „dotýkat“). [5]

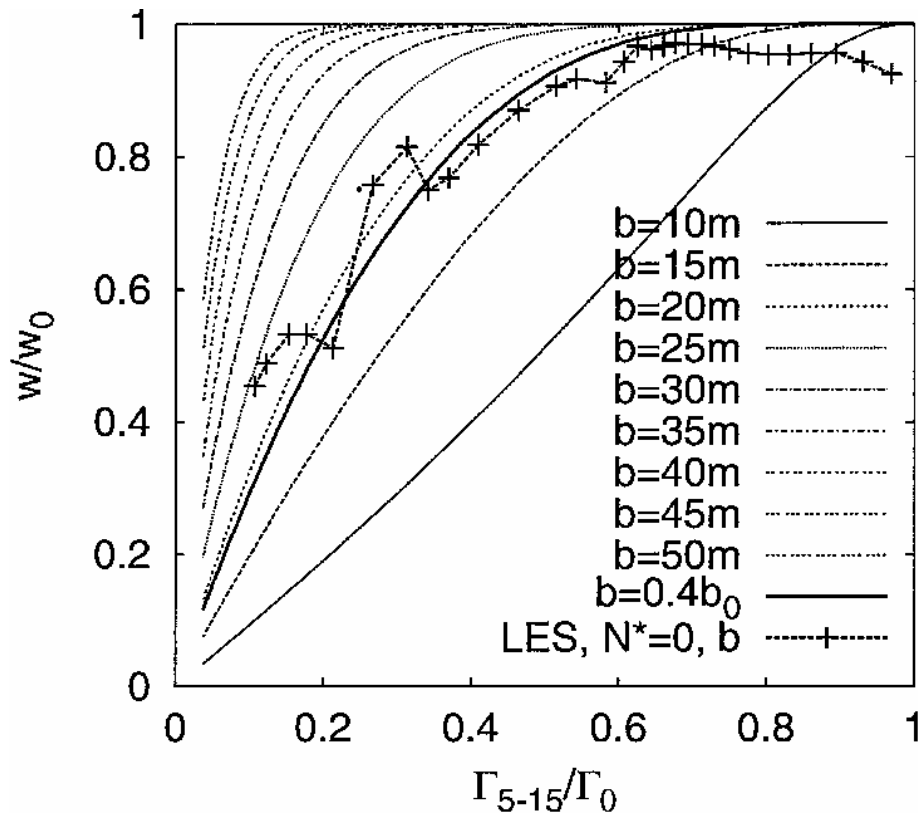
Z rovnic 20 a 21 a z pozorování sestupné rychlosti v rámci LES simulace na obrázku 11 vychází vhodný vztah pro přibližnou hodnotu *ideálního rozstupu vírů* “*b*” (z angl. “*an effective vortex spacing*”) [5]:

$$b = 0,4 b_0 \quad (22)$$

Stejně jako ideální rozstup víru “*b*” byl vytvořen *ideální poloměr jádra víru* “*r_c*” jako funkce normalizované cirkulace Γ_{5-15}^* .



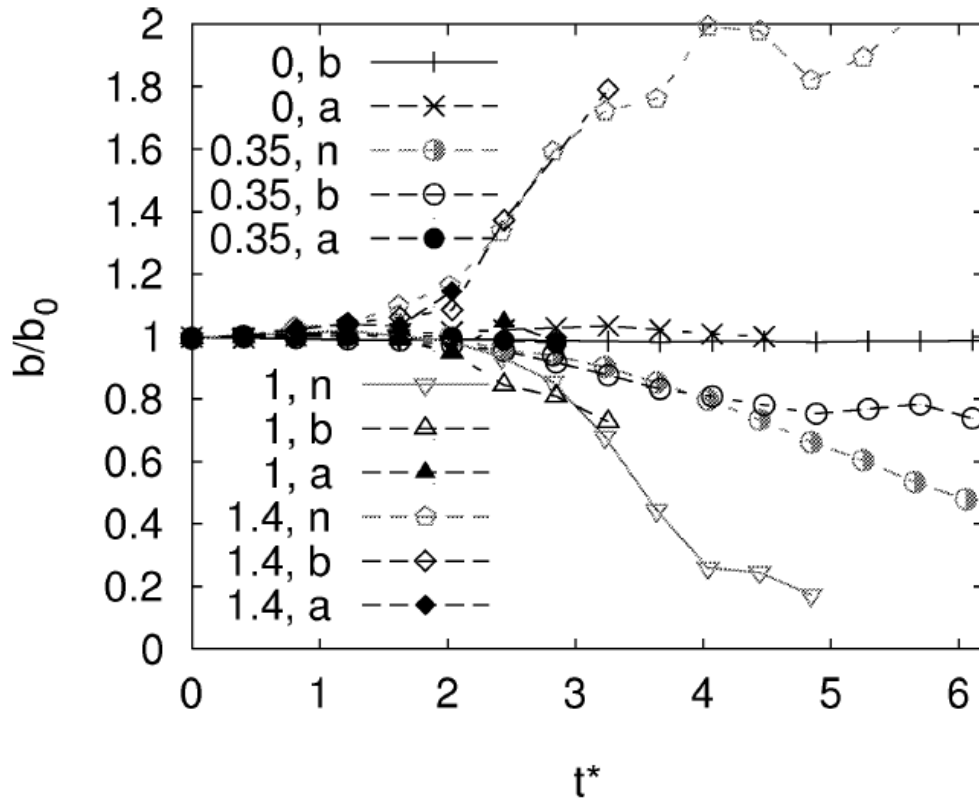
Obrázek 10. Vztah mezi ideálním poloměrem jádra víru r_c a cirkulací Γ_{5-15}^* pro rozpadající se vír [5]



Obrázek 11: Vztah mezi rychlostí klesání a Γ_{5-15}^* pro různé rozstupy vírů, křivka s křížky z LES simulace obsahuje naměřené hodnoty pro $b_0=47m$ (Boeing 747) při $N^*=0$ [5]

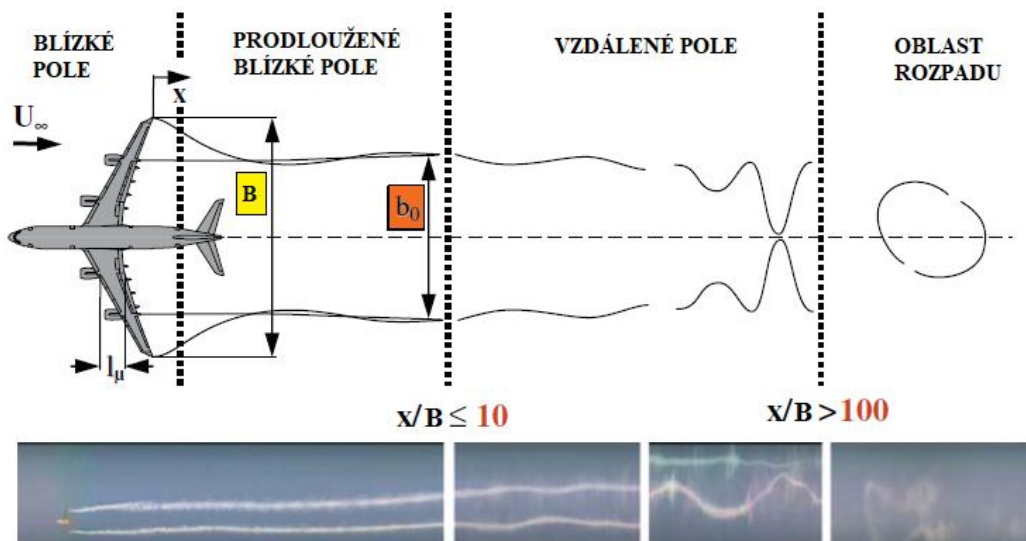
Jak už bylo zmíněno, ideální rozstup vírů a ideální poloměr jádra víru jsou jen hodnoty upravené tak, aby rychlost klesání odpovídala naměřeným LES hodnotám.

Ve skutečnosti je hodnota pro rozstup vírů v klidném ovzduší téměř identická, jako hodnota pro počáteční rozstup vírů po dokončení fáze rotace (na začátku první fáze difúze). [11] To znamená, po dokončení fáze rotace (*roll-up*) už udržují úplavové víry od sebe stejnou vzdálenost po celou dobu první fáze difúze v klidném neturbulentním prostředí. Při turbulentním prostředí už mohou rozstupy vírů nabývat různých hodnot, viz. obrázek níže.



Obrázek 12: Vztah naměřených hodnot normalizovaného rozstup úplavu $b^*=b/b_0$ ku normalizovanému času $t^*=t/t_0$ pro různé turbulentní případy "a", "b" ("n" značí neturbulentní stav) a pro BV frekvence $N^*=0, 0.35, 1, 1.4$. [11]

Ve druhé fázi rychlého rozpadu už dochází ke "sloučení" vírů (z důvodu "Crow instability"), jako je zachyceno na obrázku níže

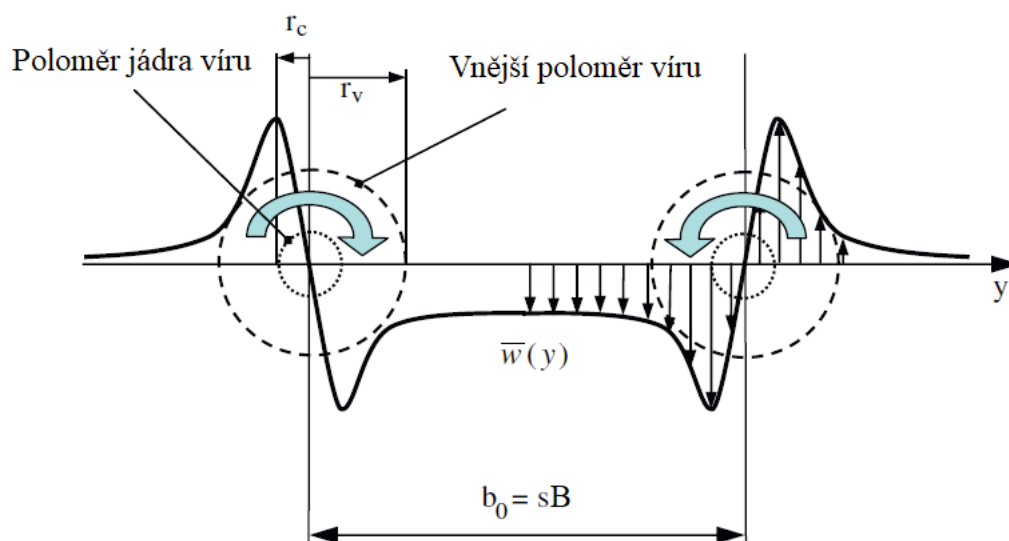


Obrázek 13: Jednotlivé fáze úplavu za letadlem a zobrazení rozstupu vírů [12]

Co se týče poloměru jádra víru, je potřeba si definovat, jaká oblast se ještě bere jako jádro víru a jaká oblast už je okolí víru.

Poloměr jádra víru je definován jako vzdálenost od středu víru, kde je tangenciální rychlost v_θ (rychlost proudících částic vzduchu) největší. [1] Za tímto poloměrem už rychlost proudění opět prudce klesá. Jak je uvedeno na obrázku níže, rozlišuje se mezi poloměrem jádra víru r_c a vnějším poloměrem víru r_v .

Vnější poloměr víru r_v je definován jako vzdálenost od středu víru, kde je tangenciální rychlost v_θ rovna hodnotě $\frac{1}{\sqrt{e}} v_{\theta(\max)}$. [13]



Obrázek 14: Definice poloměru jádra víru a vnějšího víru pro dvojici protirotujících úplavových vírů po fázi rotace [12].

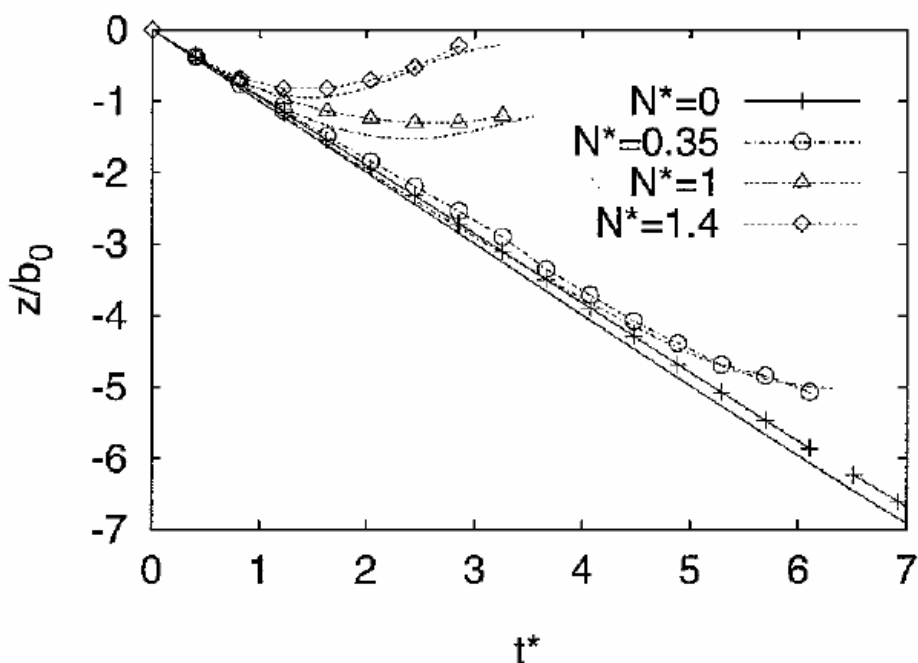
Z naměřených hodnot z LES simulací vychází, že poloměr jádra víru r_c se zpravidla pohybuje od začátku první fáze/po konci fáze rotace na hodnotách $r_c = 0,03B - 0,04B$ a vnější poloměr jádra víru $r_v = 0,10B - 0,12B$ (B =rozpětí letounu). [12]

2.3.5 Pravděpodobný postup úplavu

Jak už bylo zmíněno dříve, naprosto přesné předpovědi chování úplavových vírů nejsou možné z několika důvodů. Především je to povaha turbulence, která deformuje a transportuje víry stochastickým způsobem a vede k značným časoprostorovým změnám polohy víru a jeho síly. Kromě toho mohou být parametry letadla a zejména stav atmosféry s její vnitřní variabilitou měřeny nebo předvíhány s omezenou přesností. [5]

Níže na obrázku 15 je znázorněn pravděpodobný vertikální sestup vírů v závislosti na čase pro různé stupně stratifikace. Na ose "x" je uveden normalizovaný čas $t^*=t/t_0$ a na ose "y" je uvedena normalizovaná vertikální vzdálenost z/b_0 ; kde b_0 je počáteční rozstup vírů a z je vertikální vzdálenost.

Příklad: $z/b_0 = -1$ znamená, že pokud počáteční rozstup úplavových vírů b_0 je například 20 m, tak víry sklesaly taktéž 20m (vertikální vzdálenost $z=20$ m). Znaménko "-" značí záporné hodnoty "y-ové" osy



Obrázek 15: Srovnání sestupu mezi daty LES (symboly) a P2P (čáry) v klidném ovzduší s různými stupni rozvrstvení [5]

2.4 Efekty úplavu na letadle

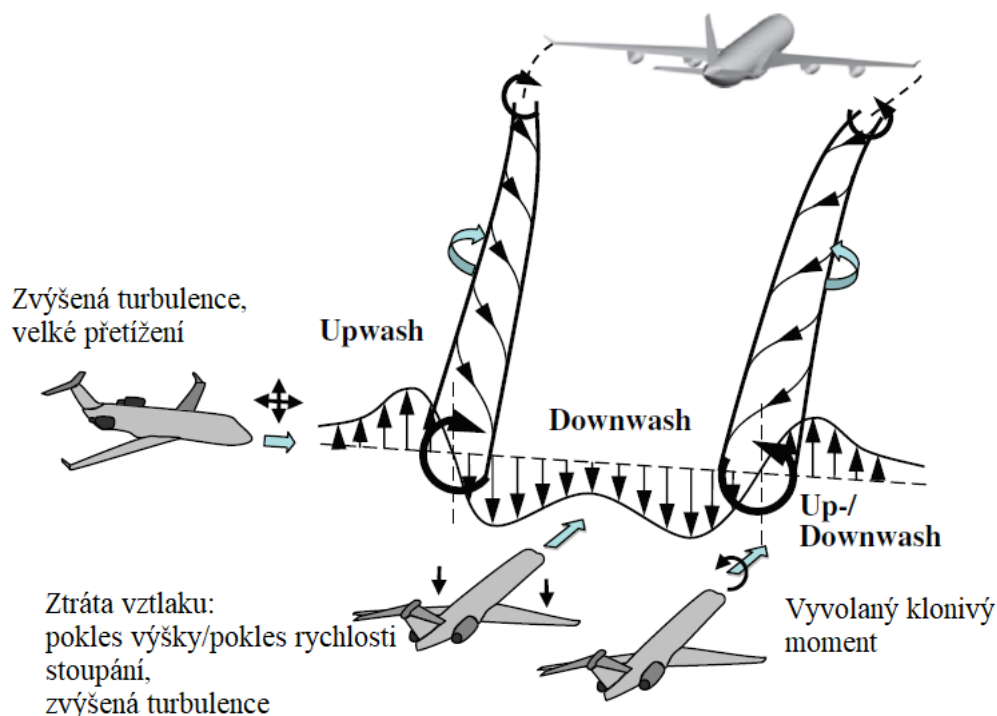
Potenciální riziko turbulence v úplavu je největší tehdy, když letadla letí po stejných tratích – tzn. těsně za sebou nebo s rozstupem určité malé hodnoty. Může dojít k náhlému neovladatelnému dosažení velkých úhlů náklonu, kdy v extrémních případech může dojít k tak velkým silám v řízení, že ani posádka letadla nemusí být schopna tyto síly přetlačit a může i nějakou dobu trvat, než se letadlo podaří uvést opět do normálního horizontálního letu v hladině.

Dochází i k častým případům, kdy vysoká rychlost náklonu může náhle vyřadit autopilota z funkce (viz. kapitola 4).

V letu v letových hladinách na stejné trati je také velice pravděpodobné, že k výpadku autopilota dojde tehdy, kdy menší letadlo vletne do úplavu většího letadla i v nižší letové hladině. Za zmínku

také stojí to, že pokud větší, těžké letadlo razantně stoupá nebo klesá (více než 1000 ft za minutu), může úplav křížovat i vícero letových hladin za letadlem. Úplav se může objevit i nad aktuální úrovní letadla, jestliže letadlo je ve fázi klesání. [16]

Jestliže letadlo křížuje trať, po které před několik desítkami sekund letěl jiný letoun, je velká pravděpodobnost, že tento průlet tratě bude mít za následek jeden nebo dva silné otřesy z důvodu křížení 2 úplavových vírů. V takovém případě může dojít i ke zranění nepřipoutaných cestujících i palubních průvodčích. Výše popsany případ je graficky znázorněn níže na obrázku.



Obrázek 16: Grafické znázornění možného nebezpečí vlétnutí do turbulence v úplavu letadla [12]

2.5 Opatření

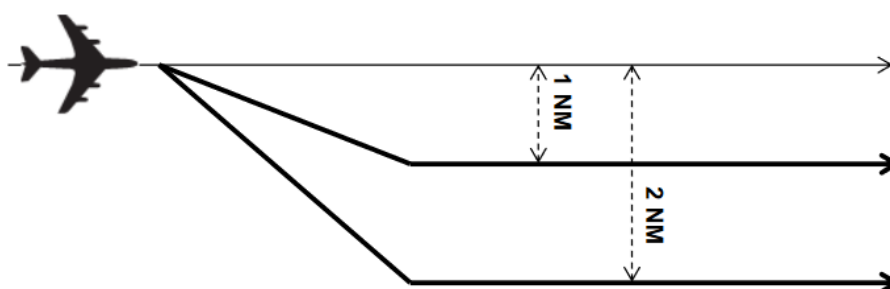
Minimální rozstupy ATC nemusí nutně vždy zabránit vlétnutí do turbulence v úplavu jiného letadlo a existuje zde určité riziko zranění pro nepřipoutané osoby na palubě.

Jedinou dostupnou přímou obranou proti zraněním cestujících je, aby letová posádka udržela situační povědomí tím, že bude sledovat jiný provoz v blízkém okolí tak, že bude naslouchat na příslušné frekvenci a sledovat displej TCAS, a také bude používat světelné označení bezpečnostního pásu a přímou komunikaci s palubním personálem za účelem dočasného zajištění všech cestujících, pokud je shledáno letadlo ve stoupání alespoň 10 NM před tímto letadlem, a služby řízení letového provozu potvrdí, že se jedná o značně větší letadlový typ.

V dnešní době skvělých počítačových technologií bohužel ještě není řídicím letového provozu ani pilotům aktivně dostupný žádný systém pro kontrolu úplavu letadel na tratích, a tudíž záleží pouze na znalostech a úsudku řídicího či pilota, zda na základě podezření případně nebezpečného úplavu navrhne odchýlení od letěné tratě („offset“). Tento způsob odchýlení se od tratě je v dnešní době piloty mnohem více využíván od nehody Challengeru z 7.1.2017. [14]

Jinak se dá taktéž uplatnit na určitých místech **SLOP („strategic lateral offset procedure“)**.

Tento SLOP postup je uplatněn zejména nad oceánským a vzdáleným kontinentálním vzdušným prostorem, kde je umožněno letadlu se odchýlit o 1 NM nebo 2 NM směrem **vpravo** od trati, ale je důležité si uvědomit, že se tímto odchýlením od tratě nestává trať nová! [15]



Obrázek 17: Příklad možnosti aplikace SLOP

Jedním z velkých důvodů vzniku tohoto SLOP postupu, bylo minimalizovat turbulence v úplavu a zajistit pohodlnější a bezpečnější provoz letadel.

Tento postup SLOP je uplatněn na základě uvážení posádky letadla a **nemusí** o tom být složky řízení letového provozu informovány, a piloti tudíž nemusí dostat ani povolení. [15]

Nicméně každá služba řízení letového provozu by si měla být vědoma toho, zda je v jejich vzdušném prostoru možné SLOP uplatnit a počítat s tím.

SLOP postupy nemohou být uplatňovány tam, kde osy letových tratí jsou horizontálně od sebe blíže než 30 NM. [15]

Letadla létající takto mimo trať musejí mít funkci automatického offset sledování – toto je dnes v drtivé většině moderních FMS.

3. Rozstupy a klasifikace letadel

Národní orgány stanovují normy vertikální a horizontální separace pro usnadnění bezpečného provozu letadel v řízeném vzdušném prostoru. Dodržování těchto norem zaručuje bezpečné odstupy od země, od jiných letadel a od chráněného vzdušného prostoru. Separační minima mají sloužit zejména k vyhnutí se turbulenci v úplavu za jinými letadly, přesto bylo zaznamenáno mnoho případů, kdy ani tyto rozstupy nebyly dostačující.

Metody používané k dosažení rozstupů jsou různé a složité v závislosti na fázi letu a relativních trajektoriích daných letadel.

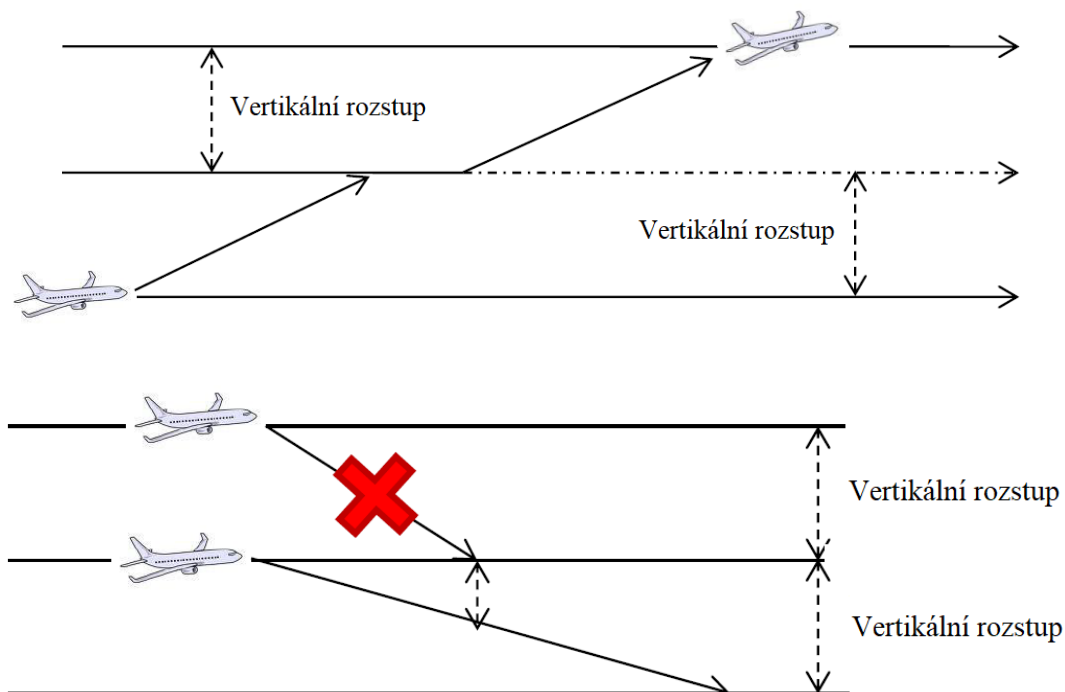
V této kapitole jsou shrnuty dnešní vertikální rozstupy a horizontální rozstupy v letové hladině.

VERTIKÁLNÍ ROZSTUPY:

Vertikální rozstup se zajišťuje požadavkem, aby letadla používající předepsané postupy pro nastavení výškoměru létala v různých hladinách vyjádřených jako letové hladiny nebo nadmořské výšky.

ICAO specifikuje minimální vertikální separace pro lety IFR jako 1 000 ft (300 m) pod FL290 a 2 000 ft (600 m) nad úrovní FL290, s výjimkou případů, kdy se použije snížená vertikální separační minima (RVSM) na 1 000 ft mezi letovými hladinami 290 a 410. Většina příslušných národních orgánů se řídí podobným pravidlem, ale může se lišit.

Pokud letadlo mění letovou hladinu, vždy při změnách letových hladin musí být rovněž dodržen vertikální rozstup. [17]



Obrázek 18: Zobrazení dodržení vertikálního rozstupu [17]

NERADAROVÉ PŘÍČNÉ ROZSTUPY:

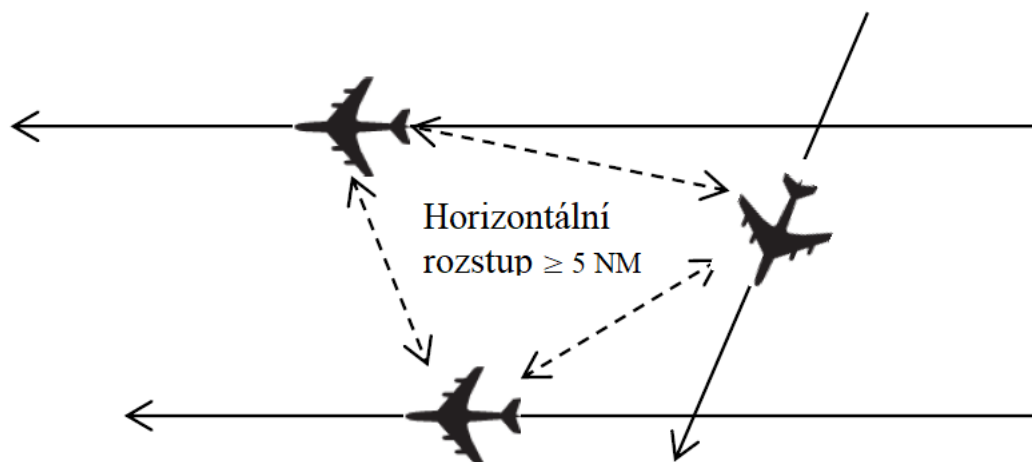
Aby mohl být příčný rozstup bezpečně zajištěn, musí být letadla na tratích rozbíhajících se nejméně o 15° (VOR). Příčný rozstup je poté zajištěn, když ochranný prostor jednoho letadla se nepřekrývá s ochranným prostorem ostatních letadel. Příčný rozstup se určí jako úhlový rozdíl mezi dvěma tratěmi a příslušného ochranného prostoru. Získaná hodnota se vyjádří jako vzdálenost od průsečíku dvou tratí, ve které je zajištěn příčný rozstup. [19]

NERADAROVÉ PODÉLNÉ ROZSTUPY:

Minimum vzdálenostního rozstupu pro letadla na stejné trati za použití prostorové navigace je 150 km (80 NM). Stejný rozstup se uplatňuje na protisměrných tratích. Znamená to tedy, že letadla, která se míjí na stejné trati, nemohou začít klesat nebo stoupat, dokud mezi nimi není rozstup 150 km (80 NM). Minima podélných rozstupů mohou být snížena až na 95 km (50 NM) v závislosti na zvýšené požadované navigační výkonnosti RNP. [19]

MINIMÁLNÍ ROZSTUPY ZALOŽENÉ NA PŘEHLEDOVÝCH SYSTÉMECH ATS:

Zavedení radarového řízení do běžného provozu v oblastech s hustým výskytem letového provozu přineslo velmi významné navýšení propustnosti vzdušného prostoru. Pokud je k dispozici radarové zařízení, je možné aplikovat radarové rozstupy, které jsou mnohem menší než rozstupy neradarové. Minimum podélného rozstupu se v tomto případě snižuje na 9,3 km (5 NM). [18]



Obrázek 19: Zobrazení dodržení horizontálního rozstupu [17]

V určitých případech, může být minimum sníženo až na 5,6 km (3 NM), pokud to schopnosti radarového zařízení na daném místě dovolují. [18]

3.1 L-4444

Minimální rozstupy z hlediska turbulence v úplavu *ve fázích přiblížení na přistání a vzletu* dle ICAO doc. 4444 jsou založeny na rozdělení letadel do skupin podle maximální certifikované vzletové hmotnosti následovně [2]:

- a) HEAVY (H) všechny typy letadel s MTOW 136 000 kg a větší
- b) MEDIUM (M) typy letadel s MTOW menší než 136 000 kg, ale větší než 7 000 kg
- c) LIGHT (L) typy letadel s MTOW 7 000 kg a menší

Jako čtvrtá kategorie, která je v současnosti brána v úvahu ICAO, je:

- d) SUPER (J) do této kategorie spadá pouze Airbus A380

Přesto tato kategorie není zatím implementována do předpisu ICAO, pouze jsou doporučovány zvýšené rozstupy za A380, a tak FAA i EUROCONTROL mají své vlastní postupy pro tento letoun.

Nicméně na oblastním řízení letového provozu se stále uplatňuje horizontální rozstup pouze **5 NM** bez ohledu na kategorie letadel za sebou letících. [14]

3.2 FAA

Federální úřad pro letectví Spojených států amerických nepoužívá kategorie rozdělení letadel podle turbulence v úplavu dle ICAO, ale má svůj vlastní systém kategorizace a příslušných rozstupů.

Dle FAA se letadla dle turbulence v úplavu dělí takto [2]:

- a) SUPER kategorie, do které v dnešní době spadá Airbus A380 a Antonov An-225
- b) HEAVY letadla s MTOW 300 000 liber (140 000 kg) a více
- c) LARGE letadla s MTOW větší než 41 000 liber (19 000 kg), ale menší než 300 000 liber (140 000 kg)
- d) SMALL letadla s MTOW 41 000 liber (19 000 kg) a méně

Pro Boeing 757 spadající podle MTOW do kategorie LARGE se používají minimální rozstupy příslušící kategorii HEAVY z důvodu množství incidentů, kdy došlo ke ztrátě kontroly nad řízením menších letadel při následování B757. Což je zapříčiněno specifickou vztakovou mechanizací tohoto stroje.

Nicméně stejně jako v Evropě, i v Americe je zaveden horizontální rozstup **5 NM**. [20]

Pokud letadlo kategorie SUPER operuje v nebo níže než hladina FL240 a letí pomaleji než 250 kt, horizontální rozstup v letové hladině může být změněn následovně:

VEDOUCÍ/NÁSLEDUJÍCÍ	HEAVY	LARGE	SMALL
SUPER	6 NM	7 NM	8 NM
HEAVY	4 NM	5 NM	5 NM

Tabulka 4: Minima radarových rozstupů podle turbulence v úplavu dle FAA [14]

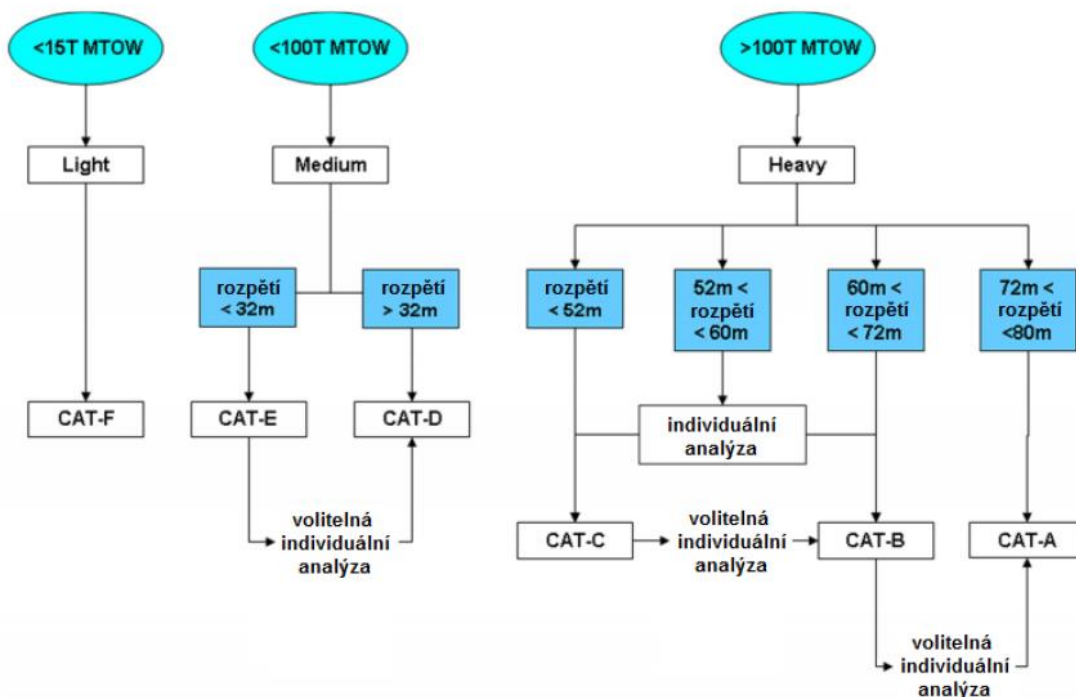
3.3 EUROCONTROL

Kvůli zvýšení kapacit zejména na letištích přišel EUROCONTROL s rekatégorizací letadel do nově vytvořených skupin. Až donedávna se používalo k zajištění rozstupů standardy podle ICAO Dokumentu 4444, které jsou více než 40 let staré a rozdělují všechna letadla pouze do 3 kategorií – HEAVY, MEDIUM, LIGHT (nedávno nově SUPER). Tato minima jsou bezpečná, avšak v dnešní době, kdy naše poznatky v tomto odvětví pokročily i díky vývoji moderních technologií jakou je např. LIDAR, je třeba zvyšovat kapacity stále vytíženějších letišť, protože rozstupy mezi některými typy strojů jsou zbytečně velké. Proto přišel EUROCONTROL s plánem re-kategorizace letadel v závislosti na turbulenci v úplavu RECAT-EU s odpovídající změnou minimálních rozstupů mezi nově vzniknuvšími kategoriemi letadel. Podle RECAT-EU je vytvořeno šest kategorií namísto původních čtyř, včetně začlenění neoficiální kategorie super heavy pro A380, což slibuje zvýšení kapacit.

Podle RECAT-EU jsou všechny typy letadel rozděleny do těchto šesti kategorií [2]:

- CAT A - “Super Heavy”
- CAT B - “Upper Heavy”
- CAT C - “Lower Heavy”
- CAT D - “Upper Medium”
- CAT E - “Lower Medium”
- CAT F - “Light”

Toto rozdělení na rozdíl od standardů ICAO nepracuje pouze s maximální vzletovou hmotností, ale také s rozpětím křídel, popřípadě je použita individuální analýza zařazení daného typu. Schéma rozdělení viz obrázek níže:



Obrázek 20: Schéma rozdělení letadel do nových kategorií podle RECAT-EU [2]

Níže na obrázku je uveden příklad dvou letadel, jejichž rozstupy v rámci RECAT-EU se liší od standardů ICAO. Jedná se o letouny Boeing B767-300 a Airbus A340-600.



Obrázek 21: Změna rozstupů podle RECAT-EU mezi letouny, které oba spadají do kategorie HEAVY podle ICAO [2]

4. Úplav za A380

Tato kapitola bude zaměřena zejména na nehody a incidenty spojené s Airbusem A380-800. Bude zde jednak popsána a podrobně rozebrána nehoda Challengeru 604 nad Arabským mořem 7.1.2017, dále pak další nahlášené incidenty včetně těch, které jsou podrobně popsány na webových stránkách The Aviation Herald, a v poslední řadě zde bude zobrazen seznam letadel, které se dostala do nebezpečné blízkosti A380 nad ČR mezi 10.12.2017 a 10.1.2018.

Všechny tyto rozbory a poznatky z rozborů budou poté zahrnuty při návrhu bezpečnostního prostoru za Airbusem 380.

4.1 Nehoda Challengeru 604

Během letu v letové hladině nad Arabským mořem v Indickém oceánu, přibližně jednu minutu po vstřícném minutí se s A380 o letovou hladinu níže, ztratila dočasně posádka Challengeru 604 kontrolu nad řízením.

Po tom, co letadlo ztratilo přibližně 9 000 ft výšky, piloti znovu dokázali obnovit kontrolu nad letounem a nouzově přistát na alternativním letišti Muscat v Omanu.

Nehoda se stala nad mezinárodními vodami, a tudíž německá BFU (*Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung*), jakožto příslušný zástupce státu registrace daného letadla, je zodpovědná za vyšetřování. [21]

4.1.1 Historie letu

V 11:52 (06:52 UTC) Challenger 604 odstartoval z dráhy 36 v Malé na Maledivách a mířil do Al-Bateen ve Spojených Arabských Emirátech. Na palubě byli 3 členové posádky a 6 cestujících.

Záznamy z FDR (Flight Data Recorder) ukazují, že autopilot byl aktivován přibližně jednu minutu po vzletu. V 07:20 UTC dosáhlo letové hladiny FL340. V 07:29 UTC letadlo vletlo do Indického vzdušného prostoru (Mumbai FIR) v bodě BIBGO a obdrželo povolení letět k bodu KITAL po trati L894. Přibližně v 08:18 UTC kopilot ohlásil dosažení bodu GOLEM.

V 06:55 UTC Airbus A380-861 odstartoval z letiště Dubai ve Spojených Arabských Emirátech a měl namířeno do Sydney v Austrálii. Letoun letěl v letové hladině FL350 jižním kursem.

Analýza obou letových dat obou letadel ukázala, že přesně v 08:38:07 UTC se obě letadla minula na vstřícných tratích s vertikálním rozstupem 1 000 ft. [21]

V 08:38:55 UTC Challenger se stále zapnutým autopilotem se začal mírně naklánět vpravo. Ve stejnou chvíli bylo zaznamenáno vychýlení křídélek proti směru rotace a začalo se rovněž měnit vertikální zrychlení letadla. V následujících přibližně 10 sekundách dosáhlo letadlo pravého náklonu 4° až 6°. V době 08:39:03 UTC se pravý náklon začal razantně zvyšovat. Během jedné vteřiny se náklon zvýšil na pravou stranu až na 42°. Ve stejnou dobu se výchylka křídélka vlevo zvýšila na 20° a rovněž se změnilo vertikální přetížení na 1,6 G. V následující sekundě se vertikální přetížení změnilo na -3,2 G. [21]

V čase 08:39:04 UTC bylo zaznamenáno příčné přetížení ve formě 0,45 G vpravo. Podélný sklon se změnil ze 3° na 1°, pak v následující vteřině na 9° a po další sekundě hned klesl na -20°. Ve stejné době bylo zaznamenáno vychýlení směrového kormidla vlevo přibližně o 11,2°, kdežto úhel náklonu vpravo se mezitím změnil ze 42° na levý náklon pod úhlem 31°.

Mezi 08:39:05 UTC a 08:39:10 UTC se změnila indikovaná vzdušná rychlost ze 277 KIAS na 248 KIAS. Výkon prvního motoru při 95 % začal postupně klesat. [21]

Za těchto 5 vteřin došlo k bočnímu zrychlení 0,94 G vlevo, vypadl autopilot a 7 vteřin trvalo Master warning. [21]

Mezi dobou 08:39:09 UTC a 08:39:41 UTC systém FDR zaznamenal ztrátu výšky zhruba 8 700 ft. Po celou tuto dobu docházelo k velkým přetížením a téměř k plným výchylkám všech kormidel. Došlo také z velkého zvýšení rychlosti a v čase 08:39:31 UTC dosáhla až 330 KIAS a po dobu 12 sekund byly vysunuty také spoilery.

Výkon motoru jedna klesl přibližně na 40 %, a když teplota mezi turbínami stoupla na 850 °C, byl levý motor vypnut.

Přibližně po 16 minutách v 08:56 UTC ohlásil tuto událost velitel letadla příslušným složkám řízení letového provozu v Mumbai, vyhlásil pohotovost, nahlásil pozici, výšku a jejich záměr letět přes bod KITAL do Omanu.

Za dalších 20 minut v 09:15 UTC se posádka pokusila o úspěšné znovuoobnovení chodu levého motoru. Následně letadlo vystoupalo do letové hladiny FL250 a v 09:56 UTC byl znovuoobnoven i autopilot. [21]

V čase 11:05 UTC nakonec bizjet přistál na letišti Muscat.

Airbus A380 pokračoval bez problému až do Sydney a v 19:58 UTC zde i úspěšně přistál.

Přibližně v 09:20 UTC docházelo k výměně informací mezi Ománským ŘLP a ŘLP v Mumbai. Mumbai původně hlásila, že důvodem, proč je bizjet pouze v letové hladině FL230, je pravděpodobně výpadek tahu motoru. O úplavu A380 se v tu dobu ještě nevědělo.

4.1.2 Prohlášení posádky Challengeru

Velitel letadla prohlásil, že to byl TCAS, co upoutalo zprvu jeho pozornost na přibližující se provoz. Poté identifikoval typ A380, aerolinku a informoval o tom i kopilota. Velitel letounu také potvrdil, že Airbus A380 je minul mírně vlevo 1 000 ft nad nimi. Kapitán prohlásil, že krátce po minutí bylo letadlo zasaženo úplavem A380. S letadlem to zatřásl, došlo k prudkému náklonu a vypadl autopilot. Reakce na toto prudké klonění obou pilotů bylo vychýlení křidélek v proti směru rotace, ale letadlo nijak na toto vychýlení křidélek nereagovalo a udělalo několik výkrutů. Dále došlo k výpadku FMS, IRS a výškoměru. Podle vyjádření pilotů, oba dva v době zasažení byli připoutáni bezpečnostními pasy kolem pasu a kopilot měl i ramenní popruhy. V prohlášení pilotů také stojí, že během turbulence ztratil velitel letadla sluchátka a po kokpitu taktéž litali stránky roztrhané letadlové příručky. Jelikož nefungoval výškoměr, kapitán prohlásil, že jelikož byl nad modrým mořem, tak mu k určení přibližné výšky hodně pomohla oblačnost. V prohlášení pilotů také stojí, že později se jim podařilo obnovit kontrolu nad letadlem v letové hladině FL240. Co se týče vypnutí levého motoru, tak piloti prohlásili, že došlo k významnému poklesu otáček a k přehřátí téměř 1 000 °C s indikací červeného světla, a tudíž motor vypnuli. Piloti podle výpovědi taktéž dokázali obnovit IRS systém s výškoměrem a mohli letět dále k bodu KITAL a opět zapnuli levý motor. Po tom, co reaktivovali FMS a autopilota, se posádka rozhodla, že přistane v Muscat. [21]

Je důležité také upozornit, že oba dva piloti měli všechny úřední dokumenty a zdravotní prohlídky v pořádku, a tudíž se v tomto směru nedopustili žádného prohřešku.

4.1.3 Prohlášení palubního průvodčí

Letuška prohlásila, že po celou dobu startu a stoupání do letové hladiny byla připoutána na svém místě a až v hladině FL100 se odpoutala. V době zasažení turbulencí stála uprostřed kabiny, kdy konala svoji práci a poskytovala potřebný servis. Čtyři ze šesti pasažérů taktéž nebyli připoutáni v té době. V prohlášení letušky stojí, že letadlo udělalo 3 výkruty, během nichž cestující „létali“ po kabině nahoru a dolů. V důsledku toho bylo několik cestujících zraněno a někteří z nich i krváceli. Ona sama utrpěla lehká zranění. Ostatní zraněné pasažéry ihned začala ošetřovat pomocí palubní lékárničky a samozřejmě o této události dále informovala posádku. [21]

4.1.4 Letadla

Bombardier CL604

CL604 je dvouproudový business jet. Jedná se o dolnoplošník s ocasní konfigurací tvaru „T“ a klasickým uspořádáním podvozku s předním příďovým kolem.

V kabině je celkem 10 míst pro cestující, z toho 8 křesel a pohovka instalovaná pravou stranou ve směru letu.

VÝROBCE	BOMBARDIER INC. CANADAIR GROUP
TYP	CL-600-2B16 (VARIANTA 604)
VÝROBNÍ SÉRIOVÉ ČÍSLO	5464
ROK VÝROBY	2000
MTOW	21 863 kg
MOTORY	GENERAL ELECTRIC CF34-3B
NÁLET	10 211 h

Tabulka 5: Detaily letadla CL604 [21]

Airbus A380

Dvoupatrový, širokotrupý dopravní letoun se čtyřmi motory. Daný letoun je dolnoplošník s klasickým uspořádáním ocasních ploch.

VÝROBCE	AIRBUS
TYP	A380-861
VÝROBNÍ SÉRIOVÉ ČÍSLO	2016
MTOW	569 000 kg
HMOTNOST V DOBĚ NEHODY	522 990 kg
MOTORY	ENGINE ALLIANCE GP7270

Tabulka 6: Detaily letadla A380 [21]

4.1.5 Meteorologické podmínky v době nehody

Nehoda se stala za denního světla. Podle výpovědi pilotů byly velmi dobré VMC podmínky s převládající modrou oblohou. Hladina oceánu byla dobře viditelná. V přibližně odhadnuté výšce 3 000 až 4 000 ft AMSL bylo pokrytí oblohy 1/8 až 2/8. Žádné kondenzační stopy vidět nebyly.

Pro Mumbai FIR nebyla vydána ani žádná zpráva významného počasí (SIGMET).

Podle systému DAR z Airbusu A380 vítr v jejich letové hladině FL350 vanul z kursu 315° rychlostí 23 kt. Airbus letěl kursem cca 143°, což znamená, že vítr byl téměř „do zad“. Venkovní teplota vzduchu byla -44°C. [21]

Co se týče nouzového letiště Muscat, tak zde podle zprávy METAR vydané v 09:50 UTC panovaly přijatelné podmínky, viz tab. 7:

VÍTR	030°/8 kt
OBLAČNOST/DOHLEDNOST	CAVOK
TEPLOTA	24 °C
ROSNÝ BOD	5 °C
BAROMETRICKÝ TLAK VZDUCHU (QNH)	1 015 hPa

Tabulka 7: Meteorologické podmínky na letišti Muscat, Oman [21]

4.1.6 Záznamy letu

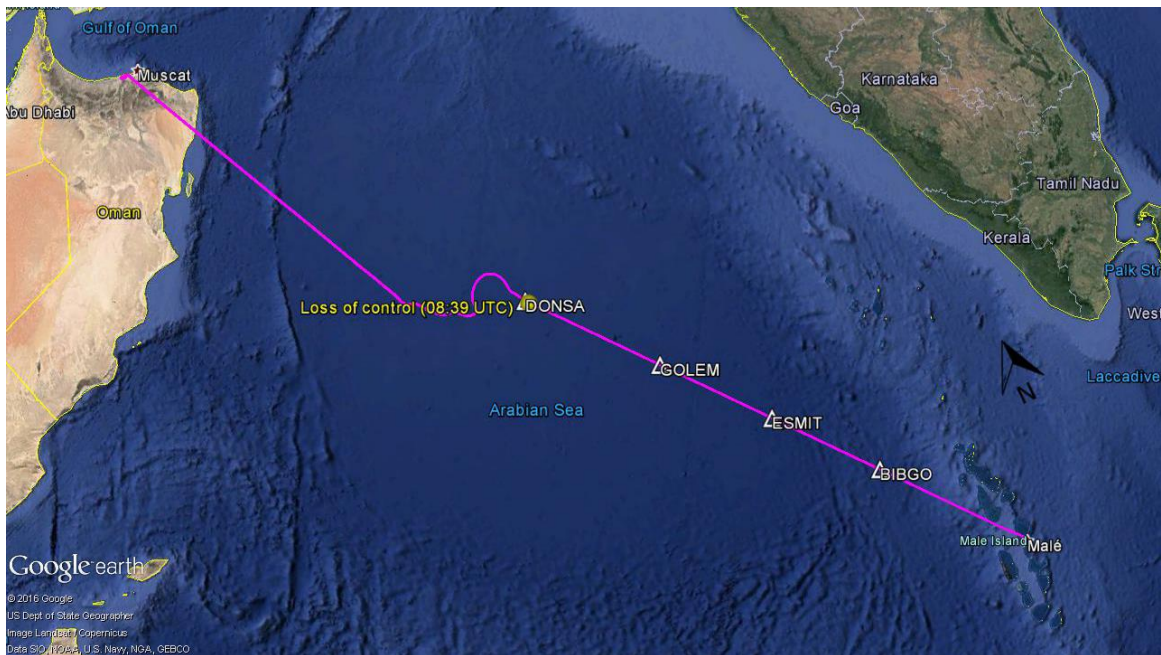
BFU nemá k dispozici žádné data z radarů letové trasy Challengerera, protože nad takovou rozsáhlou oblastí, jako je Arabské moře, není žádné radarové pokrytí, a tudíž ani radarový záznam letu A380 není k dispozici.

Nicméně tento bizjet je vybaven FDR (Flight Data Recorder), jehož podrobnosti lze vidět v tabulce 8:

VÝROBCE	L3 COMMUNICATIONS
TYP	F1000 (SOLID STATE)
SÉRIOVÉ ČÍSLO	000169408
POČET PARAMETRŮ	166
DOBA ZÁZNAMU	28,5 h

Tabulka 8: Detaily Flight Data Recorderu letadla CL604 [21]

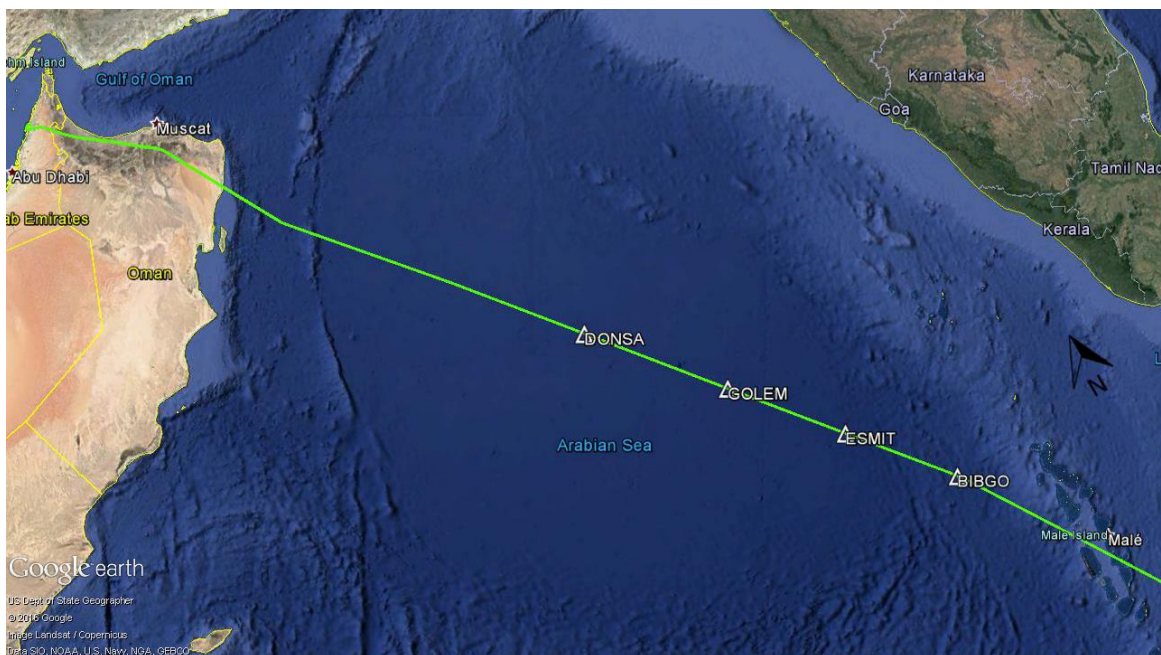
Níže na obrázku je na základě záznamů z FDR zobrazena trajektorie letu Challengerera v programu Google Earth.



Obrázek 22: Překreslení tratě CL604 na základě dat z FDR do programu Google Earth [21]

Stejně tak, jako CL604, tak i A380 bylo vybaveno zařízením, ze kterého bylo možné získat trať letadla, rychlost letu, sílu větru, TCAS zprávy atd. V případě Airbusu A380 se jednalo o DAR (Digital Access Recorder), který uchovává data z ACMS (Aircraft Condition Monitoring System).

Záznam trajektorie letu je rovněž překreslen do programu Google Earth na obrázku níže:



Obrázek 23: Překreslení tratě A380 na základě dat z DAR do programu Google Earth [21]

4.1.7 Informace o výsledku nehody

Nehoda se stala ve vzdálenosti 500 NM od nejbližší pevniny. Výrobce letadla po kontrole a informací z letu konstatoval, že drak letadla byl vystaven tak velikým násobkům přetížení a překročil svoji obálku obrátů, že shledal letadlo jako neopravitelné, a tudíž bylo odepsáno. Letadlo bylo odepsáno i přesto, že se na první pohled zdálo vše v pořádku a nebyly vidět z venku žádné viditelné poškození nebo odkapávání oleje či paliva. [21]



Obrázek 24: Vnější stav letadla po nehodě [21]

Nicméně kabina letounu byla poškozená mnohem více: došlo k poškození všech sedaček a bočních panelů, které byly potřísněné krví a kyslíkové masky vypadly ze svých krytů (viz obrázek níže):



Obrázek 25: Vnitřní stav letadla po nehodě - poškození kabiny (pohled proti směru letu) [21]

Podle provozovatele byli 4 pasažéři převezeni do nemocnice ve městě Muscat.




Jeden cestující utrpěl zranění hlavy a zlomená žebra, u dalšího cestujícího došlo ke zlomenině obratle. Další 2 cestující a palubní průvodčí utrpěli lehká zranění jako odřenin a zlomeniny nosu.

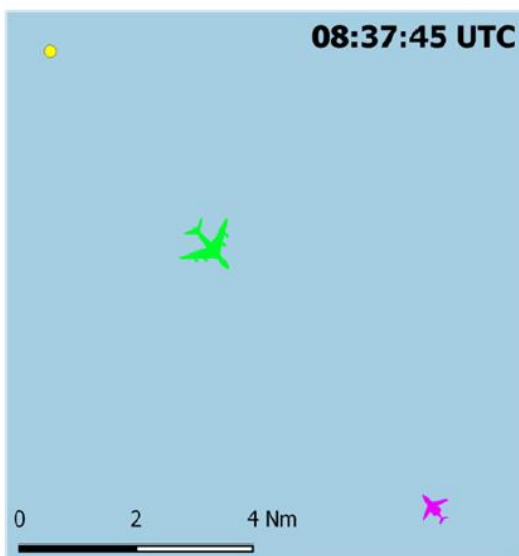
Poslední dva cestující včetně pilotů zůstali nezranění. [21]

Jak už bylo zmíněno dříve, piloti mohou v takovýchto odlehlých oblastí uplatnit SLOP, o kterém ani nemusí upozornit řízení letového provozu. Nicméně posádky si musí být vědomy toho, zda v dané oblasti může být SLOP uplatněn a tím i na dané trati. Bohužel podle seznamu tratí pro Mumbai FIR, daná trať L894 nebyla mezi tratěmi, na které se dá SLOP uplatnit.

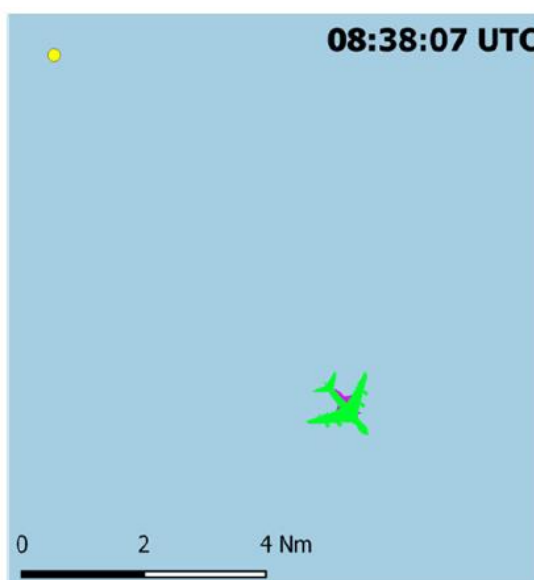
4.1.8 Shrnutí nehody

Níže na obrázcích je znova shrnuta celá situace a další komentáře a poznatky k nehodě. [21]

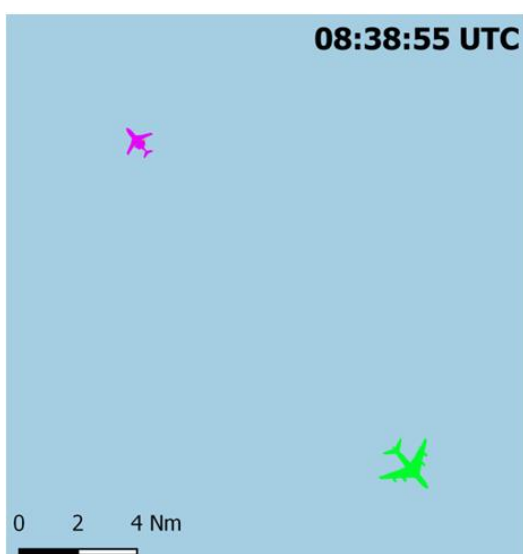
-  A380
 -  CL604
 -  Beginn unkontrollierte Fluglage / Begin of loss of control
- Flugzeuge nicht im Maßstab / Aircraft not to scale



V čase přibližně 08:37:45 UTC TCAS letadla A380 zachytil CL604 na vstříčné trati. V tu dobu byla horizontální vzdálenost obou letadel 6 NM a 1 000 ft vertikální.



V čase 08:38:07 UTC A380 přeletělo nad CL604 v relativní výšce 1 000 ft v letové hladině FL350 mírně vpravo od CL604.



V době 08:38:55 UTC došlo u CL604 v letové hladině FL340 k zasažení úplavem A380. Airbus se v tu chvíli nacházel přibližně 15 NM jiho-východním směrem.

Atmosféra hraje velice významnou roli, co se týče rozpadu a snosu úplavu.

Jak už bylo zmíněno dříve, vítr v době nehody v letové hladině FL 350 foukal ze směru 315° rychlostí 23 kt. Airbus od traťového bodu DONSA letěl kursem 143° k bodu GOLEM po trase L984.

Z toho vyplývá, že vítr vanul téměř ve směru tratě, a tudíž byla veliká pravděpodobnost, že úplav A380 nebude nikam snášen a udrží se v následující minutě přesně v trase za A380.

V době zasažení bizjetu úplavem se bizjet nacházel přibližně 15 NM = 27,8 km za A380. Z hlediska časového rozstupu uplynulo přibližně 48 s od minutí se s A380. Na základě odeslané žádosti do BFU byla zjištěna rychlost A380 v době incidentu. Rychlost byla $M=0.85$, neboli cca 490 kt. Rychlost CAS byla 290 kt. [22] Uváděná hodnota cestovní rychlosti A380 je TAS 903 km/h = 488 kt.

V roce 2003 byly založeny skupiny ad hoc Steering Group (SG) a Technical Work Group, ve kterých byli zastoupení členové ze společností: EUROCONTROL, Joint Aviation Authorities (JAA), Federal Aviation Administration (FAA) a Airbus and Det Norske Veritas (DNV). Cílem bylo specifikovat bezpečnostní požadavky tak, aby nedošlo k vlétnutí do úplavu A380 jiným letadlem. Byl vydán dokument, v jehož znění je mimo jiné následující [21]:

„Měření míry klesání úplavu ukazuje, že během letu v hladině může úplav za B744, A346 a A388 sklesat i níže než 1 000 ft pod aktuální výšku letadla; u jiných letadel spadající do kategorie HEAVY se předpokládá taktéž podobný průběh úplavu. Během měření v cestovních rychlostech bylo zjištěno, že trajektorie úplavových vírů křížuje letovou hladinu 1 000 ft pod hladinou letadla, které úplav vyvolalo, přibližně 10 až 20 NM v klidných atmosférických podmínkách. Lehčí letadla by si měla být vědoma možného nalétnutí úplavu za letadlem kategorie HEAVY nebo A388 až do horizontální vzdálenosti 20 NM a vertikální vzdálenosti 1 000 ft zejména, když letadla letí na paralelních tratích. Na základě aktuálních minimálních rozstupů, nebezpečí nalétnutí úplavu je v tuto chvíli považováno za přijatelné, nicméně doporučeno další vyšetření této záležitosti.

Bylo nahlášeno už několik případů, kdy letadlo vlétlo i do úplavu jiného letadla ve fázi stoupání či klesání. Tyto případy se i shodují se zkušebními testovacími lety s A318 za letadly B744, A388 a A346.“

4.2 Incidentsy z The Aviation Herald

Jak již bylo zmíněno, případ odepsaného Challengerera není prvním vážnějším případem, který se stal a byl nahlášen. V dnešní době stále dochází k zasažení turbulence v úplavu, nicméně ne všichni piloti toto zasažení turbulencí nahlásí.

Na internetové stránce „The Aviation Herald“ je zaznamenána většina vážnějších případů, včetně zasažení turbulence v úplavu. Kromě již popsané nehody bizjetu v předchozí podkapitole, je zde dalších 5 záznamů z nahlášených incidentů, které ale neposkytují tolik podrobných informací, jako z bizjetu.

4.2.1 Armavia A320 a Fly Emirates A388 nedaleko Tbilisi, 11.1.2009

Airbus A320-200 již zkrachovalé letecké společnosti Armavia letěl ze Sochi do Yerevanu v Armenii. Letoun se nacházel přibližně 30 NM od Tbilisi v momentě, kdy bylo zasaženo velmi silnou turbulencí v úplavu. Toto vlétnutí do turbulence způsobilo výpadek autopilota a došlo třikrát k velkému náklonu. Posádka po chvíli obnovila kontrolu nad letadlem a bezpečně doletěla do destinace bez žádných zranění na palubě.

Armavia oznámila, že letadlo letělo o 1 000 stop níže než Airbus A380-800 společnosti Fly Emirates registrace A6-EDB letící z Dubaje do New Yorku a je velké podezření, že turbulence v úplavu byla způsobena právě tímto A380.

Bohužel více informace k tomuto případu, co se týče jednotlivých rychlostí, výšce, síle a směru větru a konkrétní poloze obou letadel není k dispozici. [23]

4.2.2 Antonov An-124 a Singapore A388 nedaleko Frankfurtu, 10.2.2011

Antonov An-124 s maximální vzletovou hmotností 392 tun, registrace UR-82072, měl namířeno z Baku v Ázerbájdžánu do Mont-de-Marsan ve Francii. Jeho letová hladina byla FL320 západním směrem přibližně 37 NM východně od Frankfurtu/Main.

Airbus A380-800 společnosti Singapore Airlines s maximální vzletovou hmotností 560 tun, registrace 9V-SKH, letící z Paříže do Singaporu, letěl v letové hladině FL330 opačným směrem.

V tomto případě je ještě zahrnut Boeing 747-400, který letěl taktéž v letové hladině FL330 na východ s rozstupem 20 NM od A388.

Přibližně 1 minutu po minutí obou letadel (An-124 a A388) ztratil náhle Antonov kolem 200 stop během 15 sekund. Letoun dosahoval náklonů až 15°. Autopilot letadla tudíž začal ihned stoupat, kdy během dalších 15 sekund přestoupal letovou hladinu FL320 a dosáhl hladiny FL325. Po 2,5 minutách od vlétnutí do úplavu A388 se Antonov stabilizoval opět na letové hladině FL320.

Boeing 747 zde hrál tu roli, že v době stoupání, a tudíž přestoupání Antonova letové hladiny FL320, mýjel B747 Antonova a TCAS začal ihned hlásit „Monitor vertical speed“ a „Traffic, Traffic“. V tu dobu od sebe byla letadla 900 ft vertikálně. Po několika dalších sekundách hlásil TCAS „Clear of conflict“. [24]

V době incidentu nebylo zaznamenáno žádné významné počasí jako JetStream nebo jiné turbulence. Vítr v době incidentu vanul z kurzu 295° a síla větru byla 30kt. Letoun A380 letěl v tu dobu kurzem přibližně 110°, z čehož vyplývá, že vítr vanul přímo „do zad“ v ose trati.

4.2.3 Air France A320 a Fly Emirates A388 nedaleko Frankfurtu, 14.10.2011

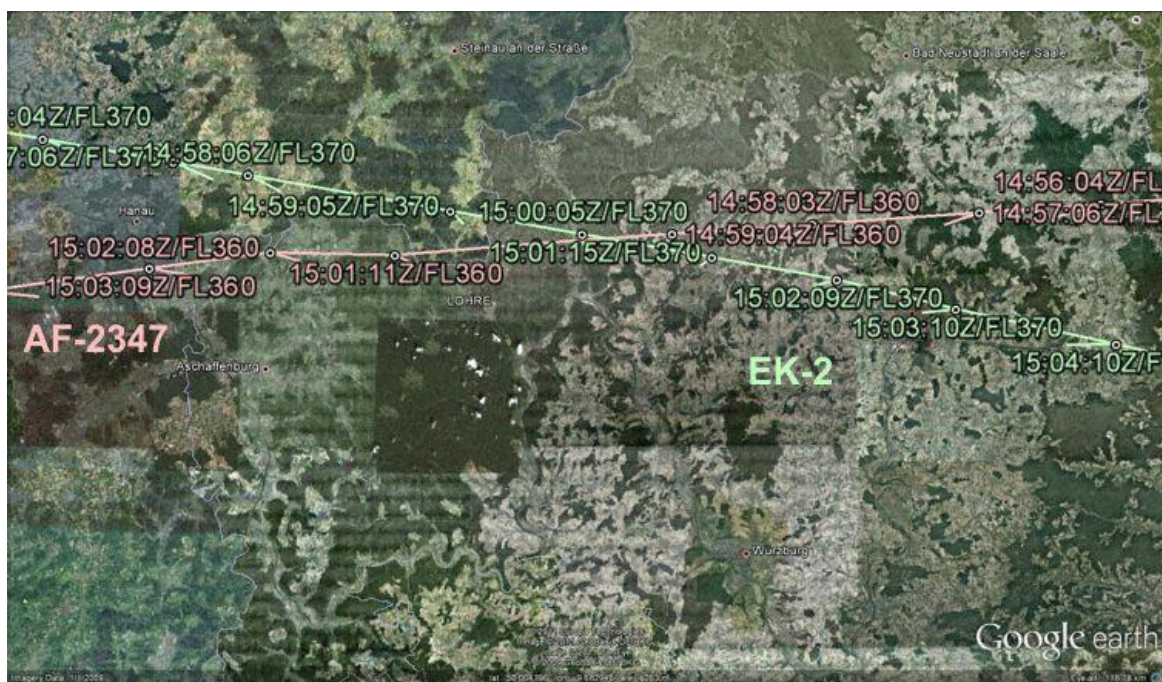
Airbus A320-200 společnosti Air France, registrace F-GFKH, měl namířeno z Varšavy do Paříže v letové hladině FL360.

Přibližně 45 NM východně od Frankfurtu v letové hladině FL370 se nacházel Airbus A388 společnosti Fly Emirates mířící z Londýna do Dubaje, registrace A6-EDG.

Německá BFU zveřejnila, že A320 minula A380 poblíž traťového bodu LOHRE. Po několika mílích nalétnul A320 úplav A380 a po dobu 20 sekund se ocitlo v turbulenci, během které docházelo k náklonům až 30°. Naštěstí nedošlo na palubě k žádným zraněním. [25]

Informace o větrů a rychlostech nejsou k dispozici.

Níže na obrázku je zobrazena trajektorie letů obou letadel.



Obrázek 26: Trajektorie letů A320 (červená) a A380 (zelená) 14.10.2011 v programu Google Earth [25]

4.2.4 British Airways A320 a Qantas A388 nedaleko Braunschweig, 16.10.2011

Airbus A320-200 společnosti British Airways, který letěl z Berlína do Londýna, se pohyboval v letové hladině FL320 přibližně 7 NM severo-východně od Braunschweig západním směrem a dostal povolení stoupat do hladiny FL360.

A380-800 společnosti Qantas z Londýna do Singaporu letěl o 1 000 ft výše v letové hladině FL330 taktéž 7 NM severo-východně od Braunschweig východním směrem.

Přibližně v 13:04:35 UTC posádka A320 nahlásila, že právě prolétla silnou turbulencí po opuštění hladiny FL320. Letadlo se prudce naklonilo a vypadl autopilot. Kopilot převzal manuální řízení nad letounem a po chvíli opět stabilizoval letadlo a obnovil autopilota.

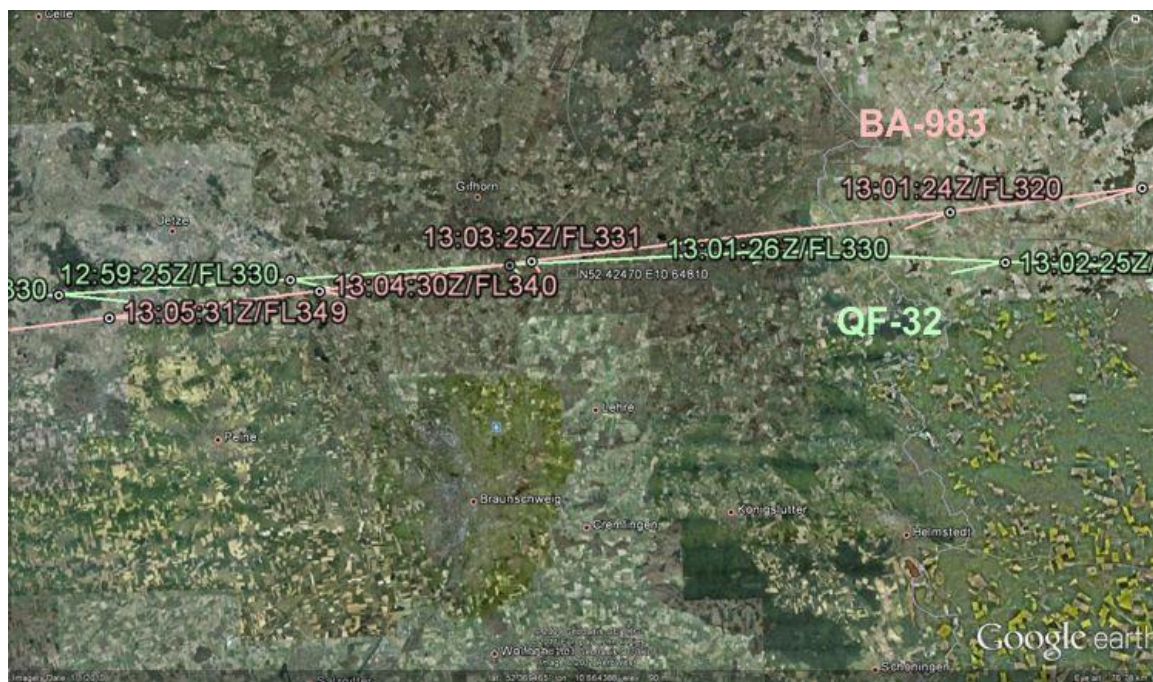
Oba dva lety úspěšně doletěly do svých destinací, nicméně na palubě A320 došlo ke 4 lehkým zraněním v důsledku prolétnutí úplavem za A380. [26]

BFU ve svém měsíčním bulletinu oznámila, že na základě údajů ze systému letounu A320 docházelo po dobu cca 10 s k náklonům mezi $-26,05^\circ$ a $+32,17^\circ$ a k vertikálním přetížením $+0,363$ a $+1,926$ G. [26]

Podle radarových dat byla A380, v době zasažení A320 úplavem, 13 NM východně a 1,5 NM jižně od A320.

Co se týče meteorologických informací v době incidentu, podle měsíčního bulletinu BFU byla dohlednost více než 40 km a vítr v letové hladině A320 v době incidentu vanul ze směru 180° rychlostí 15 kt, čehož plyne, že vítr foukal téměř z boku a byla tudíž velká pravděpodobnost, že úplav se nebude držet v ose tratě A380, ale vychýlí se ze směru.

Níže je opět na obrázku zobrazena trajektorie letů obou letadel.



Obrázek 27: Trajektorie letů A320 (červená) a A380 (zelená) 16.10.2011 v programu Google Earth [26]

4.2.5 Virgin Australia B738 a Fly Emirates A388 nedaleko Bali, 13.9.2012

Dne 13.9.2012, kolem přibližně 16:19 UTC, odletěl Boeing 737, registrace VH-YIO, společnosti Virgin Australia z letiště Bali do Brisbane v Queensland. Na palubě bylo 132 pasažérů a 6 členů posádky. V době incidentu to byl první důstojník, který byl označen jako PF („pilot flying“).

Během stoupání zažádala posádka stoupat do letové hladiny FL370, nicméně kvůli velkému provozu ve FL360 bylo posádce povoleno pouze stoupat do FL350. [27]

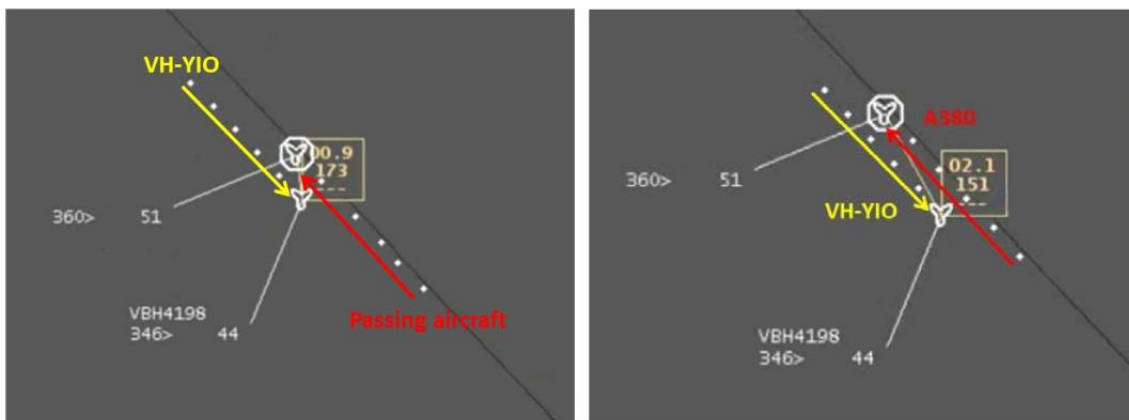
Posádka nahlásila, že v tu dobu byly klidné meteorologické podmínky.

V 16:39 UTC došlo téměř ke stabilizování letadla v letové hladině a světelné signalizace pro připoutání cestujících k sedačkám byly vypnuty. Chvilí potom zpozorovala posádka oproti provozu na TCAS přibližně 1 000 ft nad a mírně vlevo. Radarové data od Airservices Australia indikovala, že daný letoun minul B737 přibližně kolem 16:40 UTC s vertikálním rozstupem 1 400 ft a horizontálním rozstupem 0,9 NM. [27]

Kopilot uvedl, že v 16:41 UTC zažili slabý náraz, jako kdyby najeli na „dlažební kostky“. Letadlo se hned naklonilo vpravo a poté ihned na druhou stranu vlevo až k náklonům 45°. Pilot reagoval plnými pravými křídélky na tento náklon. Po chvíli se opět podařilo letoun převést do normálního horizontálního letu a pokračovali v letu.

Z radarových dat bylo možné zjistit, že v době nalétnutí turbulence bylo letadlo od B737 2,1 NM horizontálně a dokonce až 1 400 ft vertikálně daleko. Ze strany ATC byly dodrženy správné rozstupy od letadel. [27]

Kapitán letadla se ujistil od palubních průvodčích, že na palubě nejsou žádní zranění a ihned potom kontaktoval řízení letového provozu s dotazem, co to bylo za typ letadla. Od ATC přišla odpověď, že se jednalo o A380 společnosti Fly Emirates.



Obrázek 28: Vlevo poloha letadel v době minutí, vpravo poloha letadel v době vlétnutí do turbulence [27]

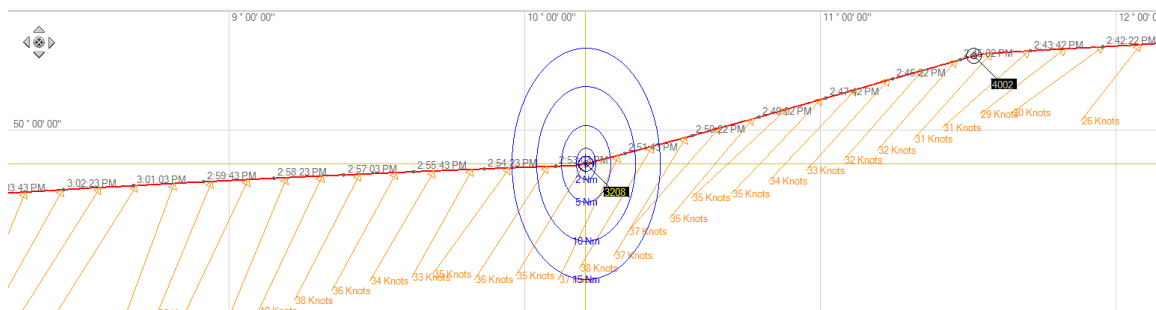
Data z FDR Boeingu 737 byla stažena a poskytnuta ATSB („Australian Transport Safety Bureau“). Z dat bylo vyčteno, že došlo k mírnému pravému náklonu až 6,5° a poté ihned vlevo až o 40,4° a letoun ztratil 40 stop své výšky. Opět jako ve většině předchozích případů uběhlo 10 s od počátku vlétnutí do úplavu až po obnovení kontroly nad letadlem.

4.3 Případ ČSA a Qatar Airways

Dne 30.5.2017 došlo k dalšímu případu turbulence v úplavu. Do úplavu opět vyvolaném A380 společnosti Qatar Airways tentokrát vlétnul Airbus A319, registrace OK-NEP.

Airbus A319, letící linku Praha – Porto, letěl v letové hladině FL380 západním směrem a kurzem 255°. Letoun se v době incidentu nacházel severo-východně od Wurzburgu v Německu.

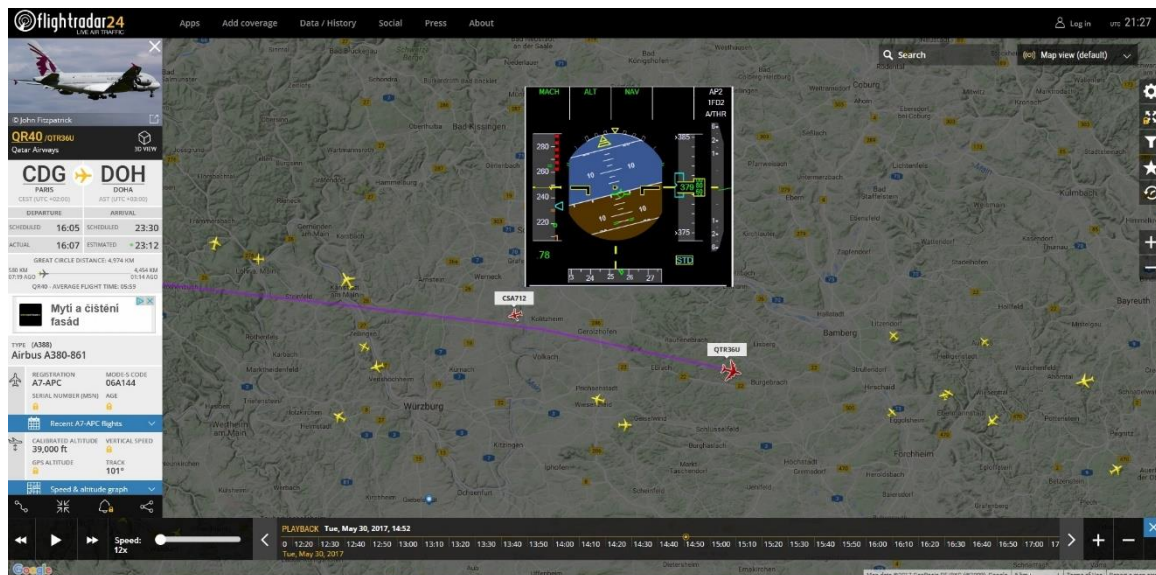
V době přibližně 14:53:03 UTC posádka A319 zaznamenala silnou turbulenci s pravým náklonem téměř 20° bez ztráty jakékoli výšky. Autopilot v tomto případě zůstal aktivní.



Obrázek 29: Zobrazení letových dat A319 v programu AirFAS (červeně trajektorie letu, oranžová barva znázorňuje vítr) [28]

Posádka po obnovení kontroly nad letounem oznámila ATC, že prolétla silnou turbulencí. Odpověď ATC bylo, že přibližně před 2 minutami prolétl o 1 000 ft výše v letové hladině FL390 Airbus A380 společnosti Qatar Airways, letící linku Paříž – Doha, kurzem 101°.

V době incidentu se A380 nacházel cca 40 km jiho-východním směrem od A319.



Obrázek 30: Zobrazení ze serveru FlightRadar24.com trajektorie letu A380 a polohy A319 včetně zobrazení jeho Primary Flight Display [28]

Z hlediska meteorologických podmínek panovaly podmínky VMC, dohlednost nad 10 km, vítr vanul ze směru 200° rychlostí 35-40 kt, teplota venkovního vzduchu - 60°. [28]

Rychlosti Airbusů jsou zobrazeny níže v tabulce. Ground speed je převzata ze zdroje z ČSA Flight Safety (FlightRadar24.com) a True Air Speed spočítaná z *Jeppesen CSG-8A Computer* s větrem 200°/35 kt.

LETADLO/RYCHLOST	GROUND SPEED	TRUE AIR SPEED
A319	419 kt	440 kt
A380	492 kt	486 kt

Tabulka 9: GS a TAS letounů A319 a A380

V příloze A je přidaná celá zpráva „*Wake Vortex Report*“ poskytnuta společností ČSA (Flight Safety).

4.4 Další případy nad územím ČR

Na základě pozorování ze serveru flightradar24.com byla zpracována analýza všech situací, kdy je pravděpodobné, že se letadlo mohlo dostat do oblasti úplavu letounu A380. Pozorování bylo zpracováno pouze nad vzdušným prostorem ČR v průběhů jednoho měsíce od 10.12.2017 do 10.01.2018.

Na základě předchozích nehod a incidentů je z výsledků pozorování patrné, že téměř každý den dochází k případům, kdy řídicí letového provozu nechají do oblasti úplavu A380 (do vzdálenosti až 40 km za A380 o 1 000 ft níže) alespoň jeden letoun vlétnout.

Bohužel pokud zde došlo k turbulenci, tak tuto skutečnost piloti nenahlásili a na základě ADS-B zpráv není možné zjistit, zda zde k nějaké turbulenci vůbec došlo (více info o ADS-B v kapitole 5). Z tohoto pozorování ze serveru FlightRadar24 byly převzaty i informace potřebné pro algoritmy v programu MATLAB, např. 24-bitová adresa letadla.

Seznam letů, u nichž byla šance turbulence v úplavu, je zobrazena v příloze B.

4.5 Analýza turbulence úplavu od IATA z databáze STEADES 2018

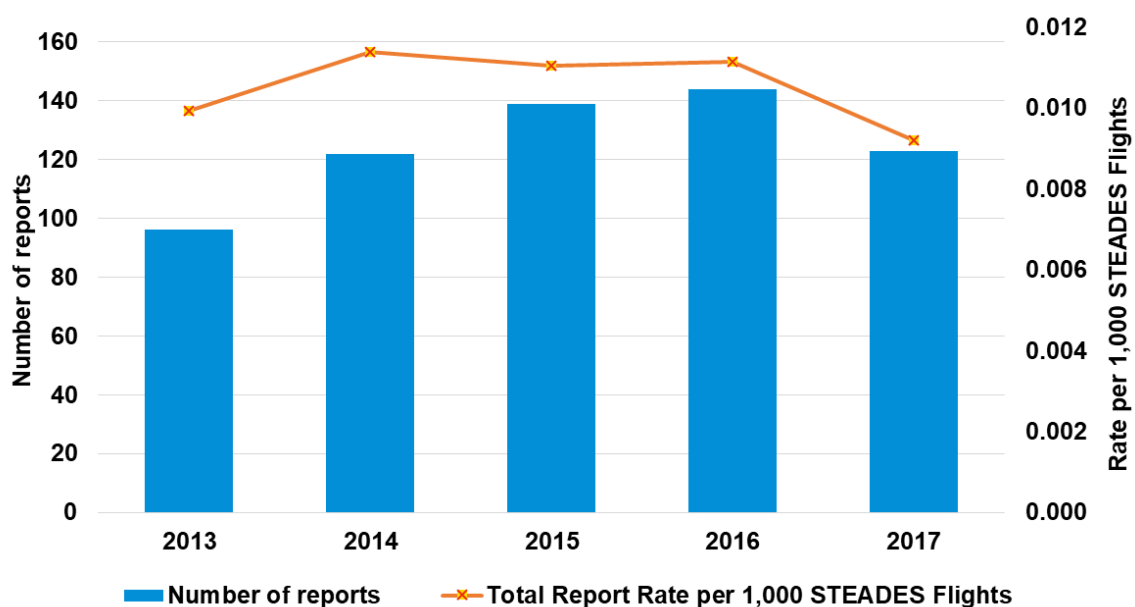
Analýza se provádí na základě zpráv o letecké bezpečnosti (*ASR = Air Safety Reports*) a zpráv o bezpečnosti kabiny (*CSR = Cabin Safety Reports*), která jsou součástí databáze IATA pro hodnocení bezpečnosti, analýzy a výměny dat (***STEADES = Safety Trend Evaluation, Analysis & Data Exchange System***). Databáze STEADES se skládá z odhalených zpráv o bezpečnostních událostech od více než 200 zúčastněných leteckých společností po celém světě, přičemž roční hlášení

přesahuje 200 000 zpráv za rok. Databáze STEADES obsahuje řadu procesů řízení kvality, které zajišťují výsledky analýzy.

Tuto studii si vyžádalo oddělení IATA: ATMOPS (*ATM Department to support ICAO Air Traffic management Operations Panel*) a doporučení skupiny Wake Turbulence Study Group ke zmírnění rizika turbulence na trati. [29]

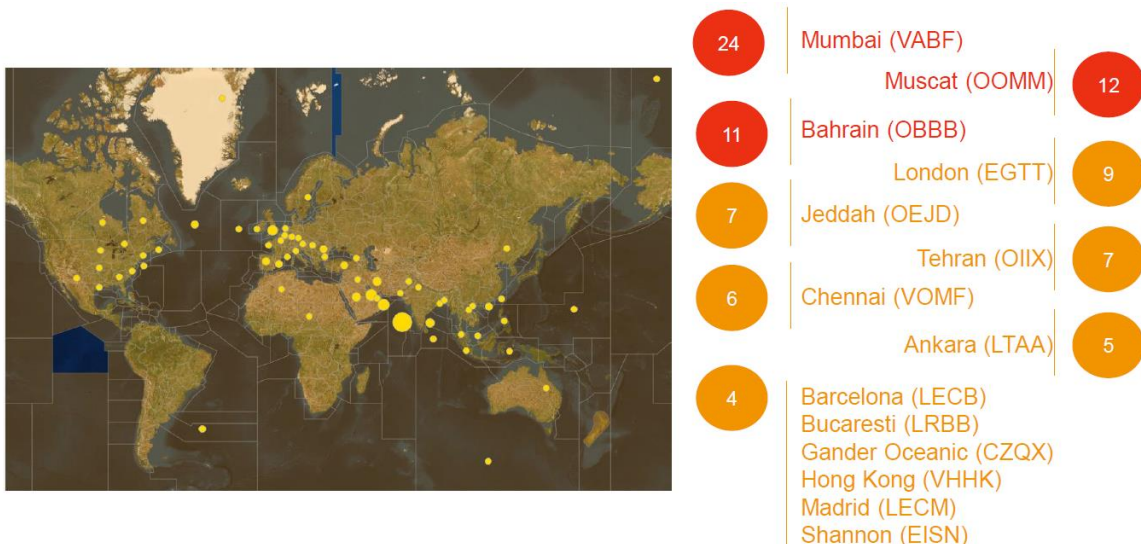
4.5.1 Nahlášené případy

Na základě obdržných dat docházelo v posledních 5 letech průměrně k 1 případu ročně na každých 100 000 letů, kdy letadlo vletlo do úplavu jiného letadla, viz. graf níže.



Obrázek 31: Analýza vlétnutí do úplavu 2013-2017 [29]

Letové informační oblasti (FIR) Mumbai, Muscat a Bahrain jsou 3 nejvíce frekventované oblasti, kde bylo nahlášeno vlétnutí do úplavu, viz. obrázek níže.



Obrázek 32: Zobrazení FIRů na světě s největším výskytem hlášení o vlétnutí do úplavu za letadlem [29]

4.5.2 Nová re-kategorizace letadel

Jak už bylo zmíněno v kapitole 3, po letech rozsáhlého společného výzkumu mezi společností EUROCONTROL, FAA, výzkumnými zařízeními a leteckým průmyslem dospěli odborníci k závěru, že požadované oddělení určitých letadel může být bezpečně sníženo. Výzkum dokázal, že kromě hmotnosti mají další vlastnosti letadla - například rychlost a rozpětí křídel - také vliv na sílu úplavu a na reakci letadla, které do tohoto úplavu vlétne. S použitím těchto informací byla letadla přeřazena do jedné ze šesti nových kategorií (A až F), které byly odvozeny novým vymezením přechodové váhy mezi starými kategoriemi, přidáním kategorie Super a rozdělením každé kategorie střední a těžké do dvou nových kategorií. [30] Výsledná kategorizace je následující:

- CAT A - "Super Heavy"
- CAT B - "Upper Heavy"
- CAT C - "Lower Heavy"
- CAT D - "Upper Medium"
- CAT E - "Lower Medium"
- CAT F - "Light"

K následujícím účelům bude stačit, když zde bude uvedeno, které letadla patří pouze do kategorie A a B:

CAT A	CAT B
AIRBUS A380	AIRBUS A330
ANTONOV AN-124	AIRBUS A340
ANTONOV AN-225	AIRBUS A350
	BOEING B747
	BOEING B777
	BOEING B787
	ILYUSHIN IL-96

Tabulka 10: Rozdělení letadel kategorie A a B podle turbulence v úplavu

4.5.3 Statistiky nahlášených případů

Z tabulky 11 založené na záznamu „Wake Turbulence RECAT“ ukazuje, že CAT D a CAT B jsou nejčastějšími kategoriemi letadel, které hlásí turbulence vznikající hlavně z letounů CAT A a CAT B, převážně středních a silných intenzit turbulencí. [29]

Generator	Encountering					
	A	B	C	D	E	F
A	15	99	7	62	5	-
B	-	37	8	73	14	-
C	-	1	1	5	1	-
D	-	2	-	16	4	1
Total # of reports	15	139	16	156	24	1

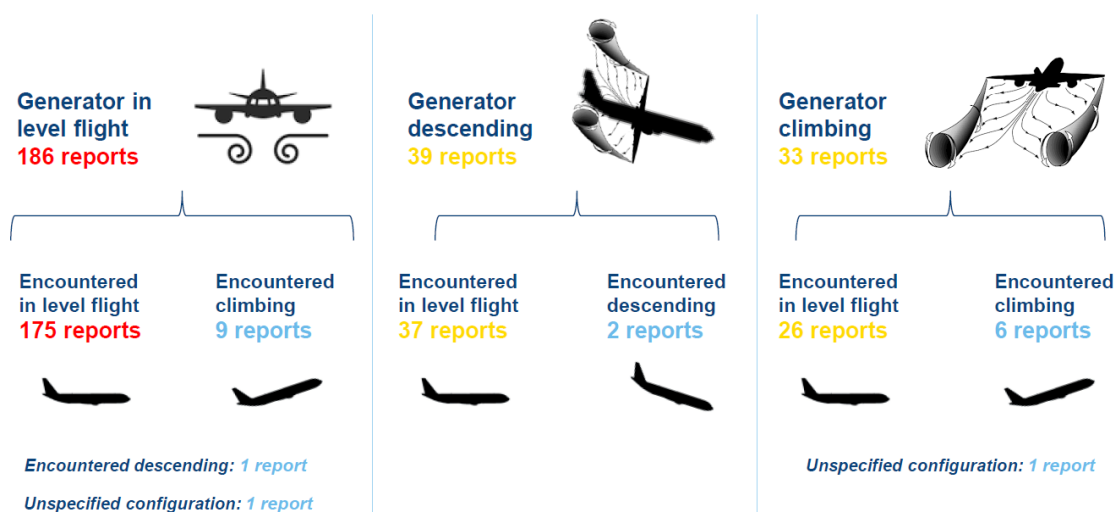
Tabulka 11: Statistiky vzájemných zasažení úplavem letadel jednotlivých kategorií [29]

Turbulence úplavu vyvozená letadly kategorií A a B má hlavně střední a silnou intenzitu, a jak je vidět výše, kategorie “Super Heavy“ a “Upper Heavy“ jsou nejnebezpečnější.

Ze statistik IATA také vyplývá, že letoun A380 má hlášeno absolutně nejvíce případů, kdy bylo jeho úplavem zasaženo jiné letadlo (185 hlášení). Na druhém místě je poté Boeing 777 (47 hlášení), a poté Boeing 747 (45 hlášení).

Naopak nejvíce letadel, které byly úplavem zasaženy, byly Boeing 777 (126krát), Airbus 320 (121krát), Airbus 330 (79krát) a Boeing 737 (56krát).

Z obrázku 33 jsou vidět statistiky vlétnutí do úplavu v jednotlivých fázích letu. V této diplomové práci se budeme zaměřovat pouze na ustálené horizontální lety. Je zřejmé, že nejvíce hlášení o vlétnutí do úplavu bylo v době, kdy letadla letěla ustálena v letové hladině. Z celkem 186 hlášení, 175 letadel udržovalo stálou letovou hladinu, dalších 9 letadel bylo v režimu stoupání, 1 v režimu klesání a 1 hlášení nebylo dále specifikováno. [29]



Obrázek 33: Počet hlášení v jednotlivých fázích letu letadla vytvářející úplav [29]

Co se týče letů **na vstříčných tratích s vertikální separací 1000 ft**, bylo zjištěno, že Airbus A380 byl letadlem produkující turbulenci v úplavu ve více než 50 % případů silné a střední intenzity turbulencí. [29]

Ze 117 hlášení bylo nahlášeno ve vertikálním rozstupu 1000 ft 5 případů vlétnutí do turbulence horizontálního rozstupu 0-5 NM, 4 případy horizontálního rozstupu 10–20 NM, 1 případ nad 20 NM a dalších zbylých 107 případů bohužel nebylo dále specifikováno.

Z těchto 117 hlášení je známo, že Airbus A380 způsobil 8 silných a 19 středních turbulencí, co týče intenzity. [29]

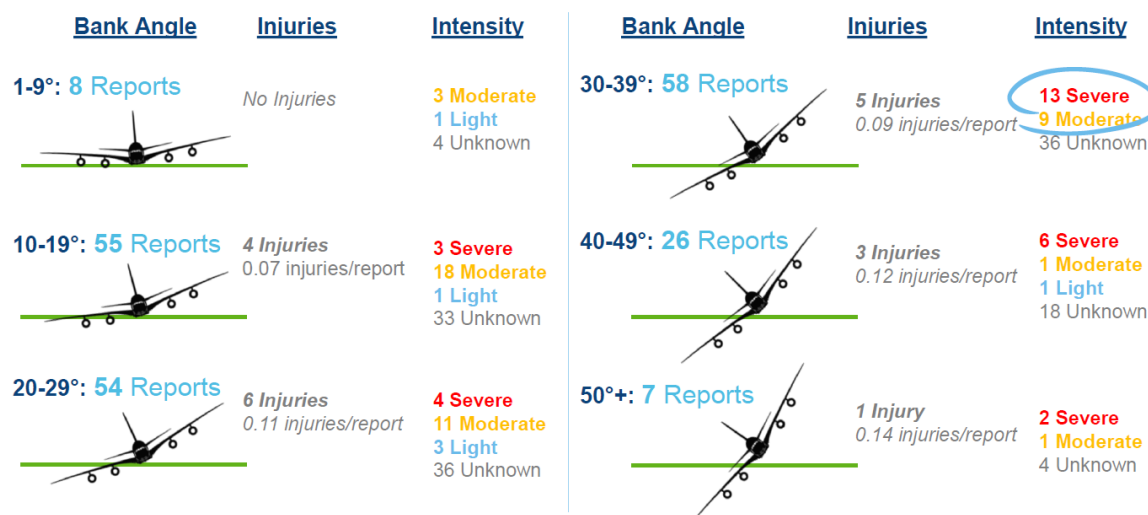
Z hlediska **letů na paralelních tratích**, zajímavostí je, že docházelo i k případům, kdy došlo k vlétnutí do turbulence **do horizontální vzdálenosti až 20 NM s vertikálním rozstupem někdy i 2000 ft.** [29]

Při těchto letech na paralelních tratích bylo nahlášeno 16 případů vlétnutí do turbulence v horizontálním rozstupu 8-20 NM ve stejné letové hladině, dalších 9 případů horizontálního rozstupu 0-20 NM o 1000 ft níže. Při vertikální vzdálenosti 2000 ft už tolik případů nahlášeno nebylo (13 případů i do vzdálenosti přes 20 NM). [29]

Ve statistice IATA jsou také zohledněny lety **na křižujících se tratích**. Na těchto křižujících tratích byl největší rozsah hlášených případů v horizontálním rozstupu 0-10 NM s vertikálním rozstupem 1000 ft. [29]

Celkem bylo nahlášeno 42 případů na křižujících se tratích, z toho 29 případů bylo silných a středních intenzit turbulence a z těchto 29 případů bylo zaznamenáno, že šestnáctkrát byl letounem vyvolujícím turbulenci v úplavu letoun A380.

Obrázek níže ze statistik IATA znázorňuje, že **úhel náklonu 30°-39°** měl nejvyšší kombinaci počtu hlášení, zranění a intenzity turbulence, které byly generovány převážně z A380, B777, B747 a A330 **s vertikálním rozstupem hlavně 1000 stop a horizontální separací menší než 20 NM.** [29]



Obrázek 34: Zobrazení intenzity turbulence a počtu zranění při jednotlivých úhlech náklonu [29]

Nejvyšší počet poranění se vyskytl při turbulencích středních intenzit, kdy při 146 hlášení došlo k 0,14 zraněním/1 hlášení.

4.5.4 Klíčové poznatky IATA

V této podkapitole budou stručně sepsány jednotlivé důležité poznatky společnosti IATA na základě databáze STEADES, kterých v této statistice bylo dosaženo [29]:

- 1) Mumbai, Muscat a Bahrain jsou 3 letové informační oblasti s největším počtem hlášení zasažení turbulencí z úplavu
- 2) Letadla kategorie B a D (*“Upper Heavy“* a *“Upper Medium“*) nahlásila nejvíce případů nalétnutí turbulence v úplavu
- 3) Turbulence z úplavu kategorií A a B nahlášená letadly kategorie B, C a D byla převážně silného a středního charakteru.
- 4) Na základě výsledků z databáze, letadla Airbus 380, Boeing 777 a Boeing 747 jsou 3 nejvíce hlášená letadla produkující turbulenci v úplavu.
- 5) Na základě výsledků z databáze, letadla Boeing 777, Airbus 320, Airbus 330 a Boeing 747 jsou letadla nejčastěji zasažená úplavem.
- 6) Největší počet případů zasažení úplavem nastal, když obě letadla letěla v ustálené letové hladině.
- 7) Na vstřícných tratích je statisticky Airbus 380 letadlem produkující turbulenci v úplavu ve více než 50 % případů silné a střední intenzity turbulence.
- 8) Na paralelních tratích došlo k nejvíce případům v horizontální vzdálenosti do 20 NM a vertikální vzdálenosti až do 2000 ft.
- 9) Na křížujících tratích byl největší rozsah hlášených případů v horizontálním rozstupu 0-10 NM s vertikálním rozstupem 1000 ft.
- 10) Úhel náklonu 30°-39° má nejvyšší kombinaci počtu hlášení, zranění a intenzity turbulence, které byly generovány převážně z A380, B777, B747 a A330 s vertikálním rozstupem hlavně 1000 stop a horizontální separací menší než 20 NM.

5. Studie incidentů na základě ADS-B dat

ADS (Automatic Dependent Surveillance) – automatické závislé sledování je systém umožňující letadlům a jiným objektům automaticky vysílat a/nebo přijímat data (data získaných z palubních systémů jako identifikace, poloha atd.) prostřednictvím datového spoje.

ADS-B (Broadcast) znamená, že jsou informace vysílány plošně všem uživatelům v dosahu. V některých případech s nízkou hustotou provozu může být tento systém použit jako náhrada radaru.

5.1 ADS-B data

Podle shromážděných ADS-B dat letounů z měsíčního pozorování nad ČR byla snaha zjistit, zda je možné podle větších vertikálních odchylek zpozorovat turbulenci v úplavu na letadle.

Jak již bylo zmíněno dříve, pozorování vertikální odchylky bylo zaměřeno na oblast až 25 NM za letoun A380 v letové hladině o 1 000 ft níže. Jelikož je z ADS-B možné zjistit pouze čas, číslo letu, výšku, rychlost a přesnou polohu, není možné v ADS-B zprávě pozorovat změny úhlu náklonu.

Analýza byla provedena z ADS-B dat stažených z fakultní ATM laboratoře. Bylo použito několik napsaných, po sobě jdoucích, algoritmů v programu MATLAB, které budou v příloze.

Prvním algoritmem pro zpracování dat je **DF17_Filter2.m**. Tento program načítá datový soubor *.dat ze složky Archiv a nejprve v hexadecimálním formátu vybere zprávy extended squitter a až poté je převádí do binární soustavy. Uloží matici MsgBin.mat obsahující zprávy v binárním formátu, kterou lze načíst v dalších programech.

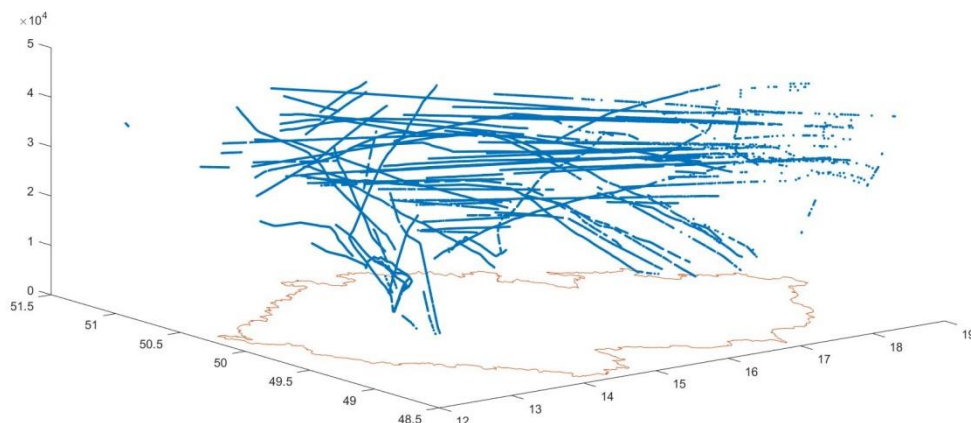
Dalším algoritmem je **CRCChecksum.m**. Program využívá funkci crc_division4.m pro vygenerování CRC kódu za účelem pozdějšího odstranění chybných zpráv.

Třetím algoritmem je **CRC_odstraneni_chybnych_zprav.m**. Program načítá matice CRCChecksum.mat, MsgBin.mat a Unix_time.mat a podle CRC kódu odstraní veškeré řádky týkající se chybných zpráv. Uloží matice MsgBin.mat a Unix_time.mat, se kterým lze již dále pracovat, protože neobsahují chybné zprávy.

Dále byl použit program na výpočet polohy – **Vypocet_polohy.m**. Načítá binární matici zpráv MsgBin.mat a vybírá polohové zprávy s TypeCode 9-18. Vypočítá z těchto zpráv zeměpisné souřadnice a uloží matice Position.mat, Lat.mat, Lon.mat a Altitude.mat, které lze později načíst v jiném programu pro další práci.

Po těchto čtyřech postupech je vše potřebné spočítáno a lze si teď hledat jednotlivé lety a zobrazovat jejich trajektorie a informace o nich pomocí následujících 2 algoritmů.

Algoritmem **Vyber_Polohu.m** je možné zobrazit všechny lety, ve 2D či 3D zobrazení, do určité letové hladiny v oblasti LKPR (dáno zvolenými souřadnicemi) nebo LKAA (dáno nejsevernějším, nejvýchodnějším, nejjihnějším a nejzápadnějším bodem ČR) – viz obrázek níže.

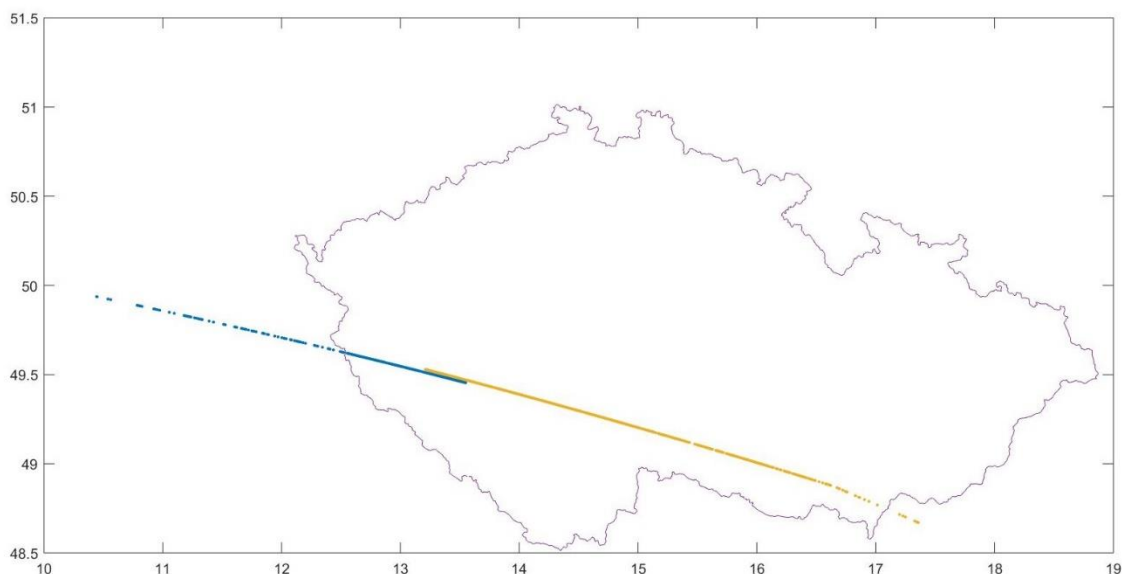


Obrázek 35: 3D zobrazení letů v době 15:20 UTC - 15:39 UTC 14/12/2017 do FL450 nad územím LKAA

Druhým algoritmem je **VyhledaniPodleAdresy.m**, kdy uživatel zadá 24-bitovou adresu v hexadecimálním formátu a program pro toto konkrétní letadlo vykreslí jeho trajektorii, vypíše volací znak, výšku i souřadnice letadla. Na obrázku níže je zobrazena situace z 31.12.2017 v době 10:20 UTC – 10:39 UTC nad územím ČR, kdy se na vstřícných tratích míjely Airbus A380 společnosti Fly Emirates a B737 Ryan Air.

Letoun A380 měl číslo letu “UAE37V” a jeho 24-bitová adresa byla “89639E”.

Boeing 737 měl číslo letu “RYR83AZ” a 24-bitová adresa “4CA859”.



Obrázek 36: 2D zobrazení trajektorie letounů A380 (oranžová, FL370) a B737 (modrá barva, FL360) v době 10:20 UTC - 10:39 UTC 31/12/2017 nad územím ČR

Na základě předchozích incidentů se při nalétnutí úplavu měnil hlavně úhel náklonu, jen v některých případech došlo i ke změně výšky a rychlosti. Velký vliv má také místo a směr nalétnutí úplavu, v jaké fázi rozpadu jsou víry úplavu atd.

Z ADS-B zpráv (neboli z vypočtených matic) lze zjistit, že po celou dobu letu určitého letadla dochází k nepatrným změnám nadmořské výšky a letadlo málokdy udrží přesnou letovou hladinu, například FL360. Odchyly mohou být 25-50 ft. Je to z toho důvodu, že letadlo mohou zasáhnout i jiné slabší turbulence nebo může výšku letounu taktéž ovlivnit proudění v atmosféře. Nicméně hlavním faktorem, který má vliv na tuto oscilaci v letové hladině, je tzv. „**Comfort mode**“ u dopravních letadel. Jedná se o takový stav letu, kdy kvůli pohodlí cestujících a dosažení co nejvíce ekonomického letu, letadlo za účelem udržení stále rychlosti nestahuje samovolně výkon motorů, ale dělá jakési „vlnky“. Takovéto vlnky způsobují odchýlení letadla od letové hladiny až o 50 ft. [28]

Z těchto důvodů je tudíž velice těžké určit z ADS-B zpráv místo, kde došlo k turbulenci vlivem vlétnutí do úplavu jiného letounu. Ani například v situaci, kdy jsme měli důkazy, že k turbulenci v úplavu opravdu došlo (viz případ ČSA/Qatar) nebylo možné z ADS-B zpráv zjistit víc, než nepatrné vertikální odchyly 25-50 ft.

5.2 BDS registr 5.0

Nicméně stále je možné zjistit úhel náklonu letadla z tzv. BDS registru 5.0 (Comm-B Data Selector).

V této podkapitole bude stručně popsáno pro lepší pochopení, co to vlastně BDS registr 5.0 je.

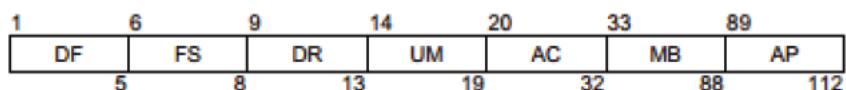
V každém přenosu módu S musí být dvě základní pole. Začátek dotazu módu S je navržen podle 5 bitů vzestupného formátu („*uplink format*“ - UF), zatímco formát všech odpovědí módu S je definován 5-bitovým formátem sestupného formátu („*downlink format*“ - DF) na začátku zprávy. Druhé základní pole se skládá z informací o 24 bitech, které jsou buď na adrese letadla (AP) nebo na identifikátoru dotazovače (PI) na konci přenosu. [31]

V odpovědi na dotaz módu S jsou vysílány čtyři kategorie odpovědí režimu S:

- Odpovědi na mód S (*Mode S all-call replies*) (DF 11)
- Odpovědi přehledové (*Surveillance and standard-length communications replies*) (DF 4, 5, 20 a 21)
- Odpovědi na prodlouženou komunikační délku (*Extended length communication replies*) (DF24)
- Přehledové odpovědi vzduch-vzduch (*Air-air surveillance replies*) (DF 0 a 16)

Dva základní typy radarových dotazů a odpovídáčů transpondérů se používají pro adresované sledovací a standardní komunikační transakce. První typ představuje krátký přenos a je charakterizován UF 4 a 5 a DF 4 a 5. Druhým typem je dlouhý dotaz a odpověď, je obsažen ve zprávách s deskriptory UF 20 a 21 a DF 20 a 21. Dále budou popsány pouze DF 20 a 21.

Zprávy odpovídače módu S s DF 20 a 21 jsou vyvolávány adresovanými radarovými dotazy a jsou obsaženy v 112-bitovém datovém poli. Na obr. níže je příkladné znázornění alokace bitů v odpovědi DF 20 Comm-B [31]:



Obrázek 37: Comm-B odpověď na nadmořskou výšku

ZKRATKA	ANGLICKÝ NÁZEV
DF	Downlink Format
FS	Flight Status
DR	Downlink Request
UM	Utility Message
AC	Altitude Code
MB	Message, Comm-B
AP	Address/Parity

Tabulka 12: Vysvětlení zkratk k odpovědi DF 30 Comm-B

Požadované letové údaje lze poskytnout pozemní stanici prostřednictvím protokolu GIBS (Ground initiated Comm-B). Protokol GIBS vyvolává zprávu Comm-B z transpondéru režimu S na palubě letadla. Tento transpondér může získat 56-bitovou vyrovnávací paměť s informacemi v reálném čase z letadlové letecké techniky, jako jsou údaje o stavu letadla v rámci 255 registrů transpondérů. Tyto 56-bitové sekvence jsou známy jako registry BDS (selektor dat Comm-B), jako je GIBS20. Data v reálném čase musí být kódována v binárním kódu a musí obsahovat aktuální informace v závislosti na počtu registrů BDS. Pokud nebyly obsažené informace v povolené lhůtě aktualizovány, musí být tento seznam vymazán. Hodnoty jsou číslem 0-F hexadecimálního kódu, který je charakterizován nižším indexovým číslem.

Podle implementace módu S v evropských předpisech *"všechna letadla provozující IFR / GAT v Evropě musí mít a provozovat odpovídače s módem S s funkcí ELS („Elementary Surveillance“ – základní přehledová funkce). Všechna státní letadla provozující IFR / GAT v Evropě musí mít letadla s vybavením ELS Mode S do 7. prosince 2017. Všechna letadla provozující IFR / GAT v Evropě, MTOW vyšší než 5700 kg nebo maximální provozní schopnost TAS větší než 250 uzlů, jsou povinna být vybavena a provozovat odpovídač módu S se základní přehledovou funkcí ELS a rozšířenou přehledovou funkcí EHS („Enhanced Surveillance“), stejně jako ADS-B 1090 MHz Extended Squitter). Toto nařízení platí pro letadla s osvědčením letové způsobilosti, které bylo poprvé vydáno dne 8. června 2016 nebo později, a zbývající část letadla bude dodatečně vybavena do 7. června 2020."* [31]

V rámci ELS se přenáší BDS registry 1.0, 1.7, 2.0, 3.0.

Nás ale v rámci této práce zajímá pouze BDS registr 5.0, který spadá do EHS.

Každý EHS odpovídací mód S musí automaticky poskytovat všechny služby ELS. EHS se rozšiřuje o další parametry, které jsou známé jako DAP („Downlink Airborne Parameters“), zajišťují dodatečná data pro řídicí letového provozu (CAPs - „Controller Access Parameters“) a pro modernizaci funkčnosti systémů ATM (SAPs – „System Access Parameters“). Protokol GIBS musí umožňovat přenos registrů BDS, které jsou uvedeny v tabulce níže. [31]

Číslo	BDS registr	Anglický název BDS registru	Název BDS registru
1	4,0	Selected vertical intention	Vybraný vertikální záměr
2	5,0	Track and turn report	Zpráva o trati a zatáčky
3	6,0	Heading and speed report	Zpráva o kurzu a rychlosti

Tabulka 13: EHS BDS registry

Hlavním cílem implementace registru EHS BDS je zlepšit systémy ATC aktuálních a „real-time“ informací s cílem předpovědět budoucí trajektorii letu. Vybrané informace o výšce obsažené v registru BDS 4,0 mohou být získány z různých palubních vstupů, v závislosti na konfiguraci letadla a jednotlivých letadlových avionikách. Poskytnuté údaje jsou omezeny na vertikální záměr letadla, což jsou informace zpracovávány v přehledových zařízeních a používány zejména pro ATS. Ostatní registry EHS předávají zprávu "Zpráva o trati a zatáčky" (registr BDS 5,0) a "Zprávu o kurzu a rychlosti" (registr BDS 6,0). Tyto registry jsou charakterizovány podobnou bitovou strukturou s pěti různými parametry, z nichž každá doplňuje extrahovaná letová data. Zvláštní parametry jsou dále uvedeny níže v tabulce. Zadaný čas aktualizace dat uvnitř těchto datových sad je nastaven na 1 sekundu. Pokud se aktualizace údajů neobjeví během 2 sekund, stavový bit pro následující parametry a bity parametru se nastaví na hodnotu '0'.

BDS registr	Soubor dat
4,0	Zvolená nadmořská výška pilotem
5,0	Úhel náklonu
	Traťový úhel
	Rychlost otáčení
	Pravá vzdušná rychlost - TAS
	Rychlost vůči zemi - GS
6,0	Kurz magnetický
	Indikovaná vzdušná rychlost - IAS
	Machovo číslo
	Barometrická výška
	Vertikální rychlost

Tabulka 14: Soubor dat poskytnutý z EHS BDS registrů [31]

Pro zkoumání úhlu náklonu letadel v nižší letové hladině, než letěl A380, byl použit algoritmus **roll_angle.m** a s tím související funkce **Decoding.m**, **Heuristic_algorithm_function.m** a upravená funkce **crc_division4.m**, kde bylo z ADS-B datového souboru, na základě známé 24-bitové ICAO adresy letadla, vygenerován a uložen úhel náklonu (*všechny související algoritmy jsou uloženy v příloze C, které musejí být uloženy v počítači ve stejné složce*). Kladné hodnoty ve vygenerované tabulce ukazují pravý náklon a záporné hodnoty znázorňují náklon levý. Nejmenší úhel náklonu, který je možný zachytit, je 0,17578125°.

Bohužel ani v tomto případě nebyla v rámci BDS registru 5,0 nalezena žádná turbulence na žádném ze zkoumaných letadel a úhly náklonu perfektně kopírují trajektorii letu.

Je to pravděpodobně způsobeno tím, že buď se za tehdejších atmosférických podmínek úplav už rozpadl, nebo úplavové víry byly větrem sneseny mimo předpokládanou oblast za A380 (směr a síla větru nebyly známy), a tudíž letadlo letící v nižší letové hladině nebylo vůbec zasaženo.

6. Návrh bezpečnostního prostoru za A380

Cílem této kapitoly je vypočítání dosahu úplavu konkrétního letounu A380 na základě teoretických znalostí z kapitoly 2 a na základě nehody bizjetu ze 7.1.2017 v kapitole přechozí. Dále bude v této kapitole dokázáno, že úplavové víry A380 v cestovním režimu a v klidných i turbulentnějších podmínkách zasahují do letové hladiny o 1000 stop níže. Tento prostor bude vypočítán podle P2P modelu od Franka Holzäpfela.

6.1 Vyjádření základních parametrů

Pro základní výpočty je potřeba si ze všeho nejdříve shrnout základní známé informace ohledně letounu A380-800. Tyto informace jsou shrnuty v tabulce níže.

PARAMETR	ZNAČKA (JEDNOTKA)	HODNOTA
HMOTNOST A/C V DOBĚ NEHODY	m (kg)	522 990
ROZPĚTÍ KŘÍDEL	B (m)	79,75
PLOCHA KŘÍDLA	A (m ²)	845
CESTOVNÍ RYCHLOST	v (m/s)	251
ŠTÍHLOST KŘÍDLA	A _R (-)	7,53

Tabulka 15: Základní parametry letounu A380-800

Abychom výpočet měli co nejjednodušší, postup bude vztažen k nehodě Challengeru a bude cílem matematicky dokázat výskyt úplavu v této nižší letové hladině (FL340).

Jak už bylo zmíněno dříve, A380 se pohyboval v letové hladině FL350, neboli **h = 10 606 m** nad mořem.

Venkovní teplota činila **T = -44 °C**.

Jelikož víme, že hustota vzduchu podle MSA je v úrovni hladiny moře 1,225 kg/m³, lze odvodit hustotu vzduchu ve výšce 10 606 m ze vztahu:

$$\rho = 1,225 \left(1 - \frac{H}{44308}\right)^{4,2553} \quad (23)$$

$$\rho = 1,225 \left(1 - \frac{10606}{44308}\right)^{4,2553} \text{ kg/m}^3 \quad (23)$$

čehož vyplývá, že hustota vzduchu v této výšce je po zaokrouhlení **ρ = 0,382 kg/m³**.

Taktéž v tomto případě budeme uvažovat elipticky zatížené křídlo, a proto si vyjádříme faktor zatížení křídla s („spanwise load factor“) jako $\pi/4$.

6.2 Výpočet referenčního času letadla A380-800

Ze všeho nejdříve budeme chtít zjistit stáří úplavu. Jak je psáno ve druhé kapitole, pro popis stáří úplavu letounu se doporučuje používat t^* .

Začneme tím, že si spočítáme hodnoty potřebné pro referenční čas t_0 neboli dobu, po které je ukončena fáze rotace a protitotující víry mají stejnou sestupnou tendenci a je mezi jejich jádry konstantní vzdálenost.

Ze všech vztahů v podkapitole 2.2.1 je vidět, že je zde spousta parametrů, které neznáme. Pro výpočet referenčního času t_0 si nejprve spočítáme referenční délku b_0 neboli počáteční rozstup vírů:

$$b_0 = s \cdot B \quad (24)$$

$$b_0 = \frac{\pi}{4} \cdot 79,75 \text{ m} \quad (24)$$

Ze vztahu dostáváme po zaokrouhlení hodnotu pro počáteční rozstup vírů $b_0 = 62,64 \text{ m}$.

Dále je potřeba zjistit počáteční cirkulaci úplavu Γ_0 neboli jeho sílu. Ta se dá vyjádřit ze vztahu 5, kde všechny proměnné už známe:

$$\Gamma_0 = \frac{mg}{\rho s B v} \quad (5)$$

$$\Gamma_0 = \frac{522\,990,9,81}{0,382 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 79,75 \cdot 251} \text{ m}^2/\text{s} \quad (5)$$

Počáteční síla rotace vírů tedy vychází přibližně $\Gamma_0 = 854,3 \text{ m}^2/\text{s}$.

Pro pozdější výpočty bude vhodné si rovnou vyjádřit i součinitel vztlaku C_L letounu A388. Jelikož už známe počáteční cirkulaci úplavu, ze vztahu 4

$$\Gamma_0 = \frac{v B C_L}{2 s A_R} \quad (4)$$

si můžeme vyjádřit součinitel vztlaku C_L :

$$C_L = \frac{2sA_R\Gamma_0}{vB} \quad (25)$$

$$C_L = \frac{2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 7,53.854,3}{251.79,75} \quad (25)$$

a po dosazení dostáváme přibližnou hodnotu $C_L = \mathbf{0,505}$.

Nyní máme všechny potřebné veličiny pro vypočítání referenčního času t_0 do vztahu 2 nebo 6.

Vybereme si například vztah 2 a do něj dosadíme všechny známé hodnoty:

$$t_0 = 2\pi \frac{b_0^2}{\Gamma_0} = 2\pi s^2 \frac{B^2}{\Gamma_0} \quad (2)$$

Nyní dosadíme hodnoty do tohoto základního vzorce, a to pouze do první části: $t_0 = 2\pi \frac{b_0^2}{\Gamma_0}$

$$t_0 = 2.3,14 \frac{62,64^2}{854,3} \text{ s} \quad (2)$$

Z výpočtu můžeme říci, že fáze rotace je ukončena po referenční době $t_0 = \mathbf{28,9 \text{ s}}$.

6.3 Výpočet doby trvání a rychlosti klesání indukovaných vírů letadla A380-800

Díky vypočítanému referenčnímu času t_0 , po kterém mají protitrotující víry konstantní sestupnou tendenci, jsme schopni jednoduchým vztahem 7 vyjádřit numerickou hodnotu referenční rychlosti w_0 , která představuje počáteční rychlost klesání obou protitrotujících vírů:

$$w_0 = \frac{b_0}{t_0} = \frac{sB}{t_0} = \frac{C_L v}{4\pi s^2 A_R} \quad (7)$$

Opět pro jednoduchost výpočtu stačí dosadit pouze do první části základního vzorce: $w_0 = \frac{b_0}{t_0}$

$$w_0 = \frac{62,64}{28,9} \text{ m/s}$$

Počáteční rychlost klesání úplavových indukovaných vírů (úplavu) v klidném ovzduší je po dosažení $w_0 = 2,17 \text{ m/s}$.

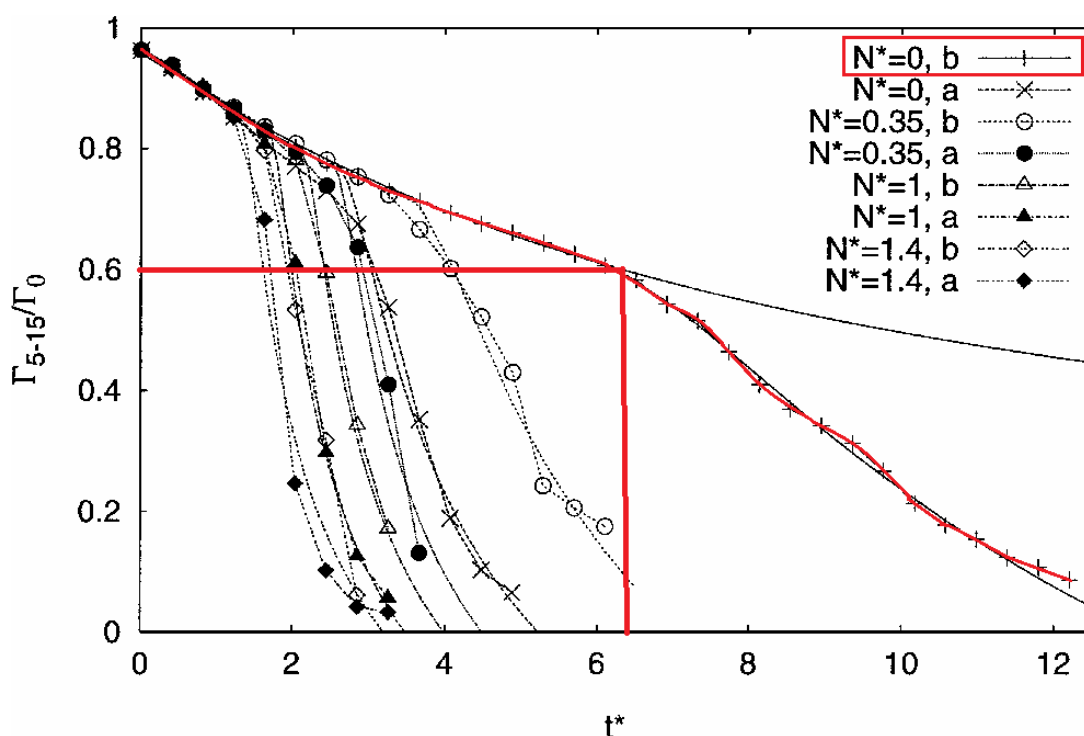
Všechny dosud spočítané hodnoty jsou fixní pro letadlo A380-800 bez ohledu na turbulenci nebo vítr. Samozřejmě, pokud A380 poletí v jiných podmínkách (stoupání, klesání, jiná hmotnost, jiná výška, jiná rychlost), všechny dosud vypočítané veličiny se od toho odvíjí.

6.4 Výpočet úplavu letounu A380 v klidných meteorologických podmínkách

V následujících postupech budeme tedy nejdříve uvažovat případ, kdy letadlo letělo v klidném ovzduší bez turbulencí a větru (nejhorší možný případ pro rozpad úplavu), a poté až zahrneme už i určitou hodnotu *BV frekvence* - N .

Z důvodu nedostatku prostředků pro výtvary simulací a potřebných dat budou v této diplomové práci porovnávány výsledné hodnoty z výpočtů letounu A380 z předchozích kapitol s grafy v P2P modelu.

Nejprve zjistíme dobu, po které začíná úplav letounu A380 přecházet z první fáze difúze do fáze rychlého rozpadu. Pro tento odhad si můžeme vybrat obrázek 4 z předchozí kapitoly, viz níže:



Obrázek 38: Určení normalizované cirkulace na konci fáze difúze pro $N^*=0$ (b) a při $\Gamma_0 = 854,3 \text{ m}^2/\text{s}$

V našem případě si vybereme hned první čáru s křížky ($N^*=0$, případ b). Pro připomenutí, případ b v grafu LES simulací od Holzäpfela značí případ, kdy jsou turbulence ovlivňující víry způsobené pouze letadlem.

Zde vidíme, že se úplavové víry při nulové normalizované stratifikaci začínají rozpadat v normalizovaném čase $t^* = 6,5$.

Ze vztahu $t^* = t/t_0$ dokážeme spočítat dobu po průletu t :

$$t = t^* \cdot t_0 = 6,5 \cdot 28,9 = \mathbf{188 \text{ s}}$$

Z výpočtu výše už je vidět, že při klidných atmosférických podmínkách se úplav začne rozpadat teprve 3 minuty od průletu určitého místa.

Normalizovaná cirkulace úplavu (síla úplavu) je v této fázi 0,6. Z toho vyplývá, že jsme schopni ze vztahu $\Gamma_{5-15}^* = \frac{\Gamma_{5-15}}{\Gamma_0}$ zjistit i aktuální sílu úplavu letounu A380 v době počátku rozpadu:

$$\Gamma_{5-15} = \Gamma_{5-15}^* \cdot \Gamma_0 = 0,6 \cdot 854,3 = 512,58 \text{ m}^2/\text{s}$$

Síla úplavu po 3 minutách je tedy více než 50 % z původní hodnoty (*pro porovnání – tuto stejnou sílu úplavu by měl v momentě průletu ve stejné cestovní hladině, při stejné cestovní rychlosti a stejných meteorologických podmínkách plně naložený Boeing 767-300ER*).

Z obrázku 38 výše je taktéž vidět, že úplavové víry se stále ještě dokáží vyskytovat v místě průletu po době $t^*=12$ (cca 5,5 minuty od průletu) i když v nepatrné síle, téměř před úplným rozpadem.

Pro **výpočet horizontální dostupy** úplavu letounu A380 můžeme použít už data z dřívějšího výpočtu, tzn. víme, že první fáze trvá do doby $t^*=6,5$ (**188s**) a druhá fáze až do doby $t^*=12$ (**347s**).

V tomto případě můžeme použít při výpočtu pravou vzdušnou rychlost TAS a ne GS, protože se předpokládá, že úplavové víry jsou taktéž snášeny větrem. Pravá vzdušná rychlost TAS letadla A380 v době nehody byla v přepočtu 251 m/s.

Z jednoduchého známého fyzikálního výpočtu $v = s/t$ lze zjistit vzdálenost, kterou letadlo uletí v průběhu jak fáze difúze, tak fáze rychlého rozpadu úplavových vírů.

V našem případě budeme počítat s tím, že od okamžiku průletu letadla do začátku druhé fáze rychlého rozpadu uplyne 188 s ($t^*=6,5$):

$$s = v \cdot t = 251 \cdot 188 = 47\,188 \text{ m} = \mathbf{25,5 \text{ NM}}$$

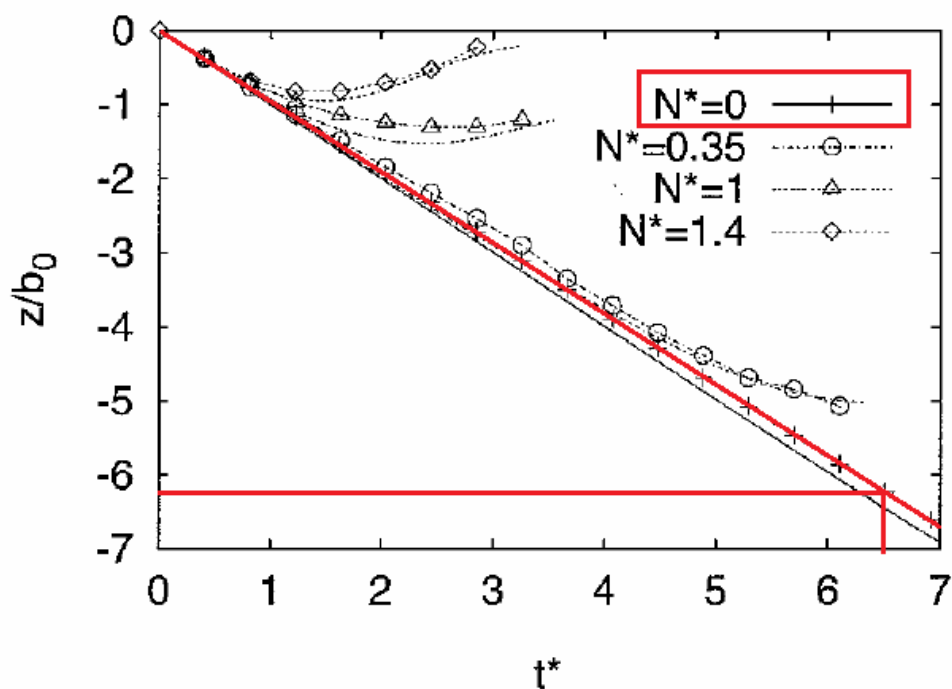
Z výpočtu plyne, že turbulentní víry dokáží přetrvávat v průběhu první fáze před rozpadem až do vzdálenosti po zaokrouhlení přibližně 25,5 NM za letadlem.

Stejný postup platí i pro výpočet druhé fáze rozpadu vírů 347 sekund po průletu letadla ($t^*=12$):

$$s = v \cdot t = 251 \cdot 347 = 87\,097 \text{ m} = \mathbf{47 \text{ NM}}$$

Vidíme, že úplavové víry se za klidného ovzduší úplně rozpadnou až 47 NM za letadlem.

Co se týče **vertikálního dostupu** úplavu, tak budeme vycházet z obrázku 39 níže. Zde máme zobrazen vertikální dostup úplavu v závislosti na normalizovaném čase. Opět použijeme křivku pro nulovou stratifikaci (červená barva).



Obrázek 39: Určení vertikální vzdálenosti vírů na konci fáze difúze pro $N^*=0$ a při $b_0=62,64\text{m}$

Pokud si za b_0 (počáteční rozstup vírů) dosadíme již vypočítanou hodnotu 62,64 m, pak lze ze vztahu z/b_0 zjistit, že úplavové víry na konci první fáze a na začátku druhé fáze rychlého rozpadu v normalizovaném čase $t^* = 6,5$ dosahuje vertikální vzdálenosti $z/b_0=6,25$:

$$z = b_0 \cdot 6,25 = 62,64 \cdot 6,25 = 391,5 \text{ m} = \mathbf{1292 \text{ ft}}$$

Z tohoto výpočtu je dokázáno, že **úplav Airbusu A380 jednoduše zasahuje mnohem níže, než 1000 ft** pod jeho aktuální letovou hladinu v horizontálním letu při klidných atmosférických podmínkách, a teprve až poté se začíná rychle rozpadat.

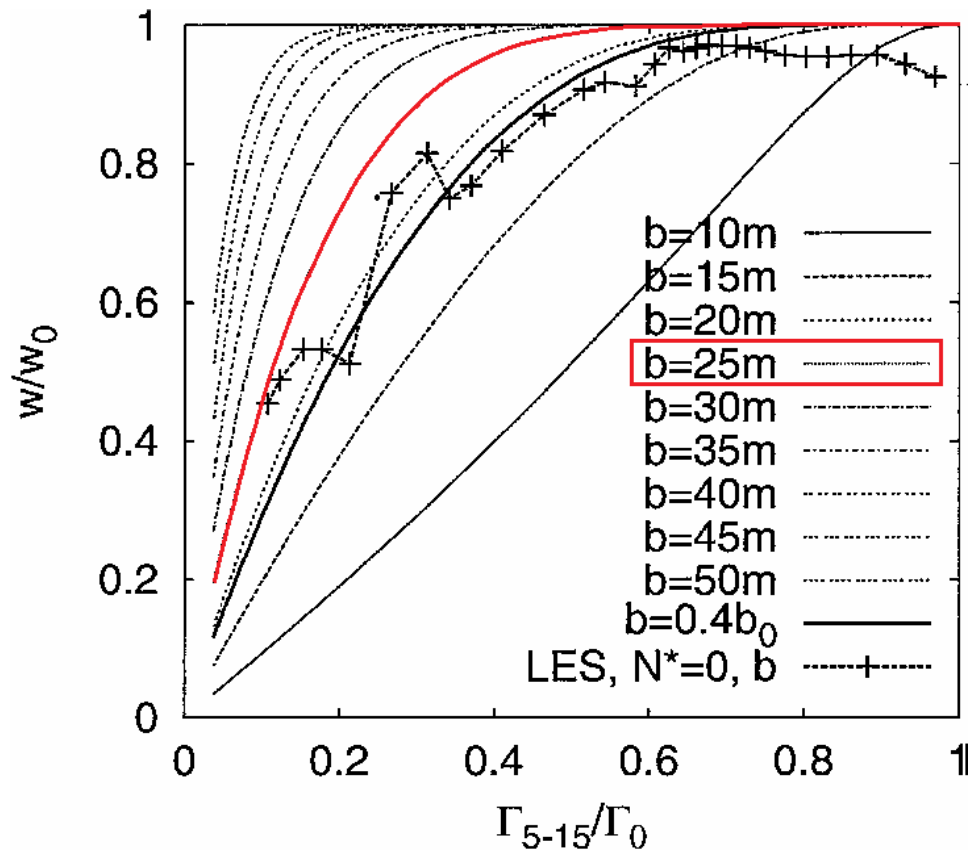
Pro zjištění sestupné rychlosti budeme potřebovat hodnoty pro ideální rozstup vírů i poloměr jádra víru („*an effective vortex spacing*“ a „*an effective vortex core radius*“). Použijeme již předchozí grafy 38 a 39 z této kapitoly a obrázek 40 (vztah mezi rychlosti klesání a síly úplavu). Pro zjištění hodnoty „*b*“ („*an effective vortex spacing*“) použijeme již dříve uvedený vztah 22 a hodnotu b_0 :

$$b = 0,4 \cdot b_0$$

$$b = 0,4 \cdot 62,64 = 25,056 \text{ m} \approx 25 \text{ m}$$

Hodnota b pro ideální rozstup vírů úplavu nám vyšla v případě letounu A380 po zaokrouhlení přibližně 25 m.

Tím pádem si můžeme zvolit červenou křivku $b=25 \text{ m}$ z obrázku 40 níže, která odpovídá našemu případu, a ze které budeme vycházet.



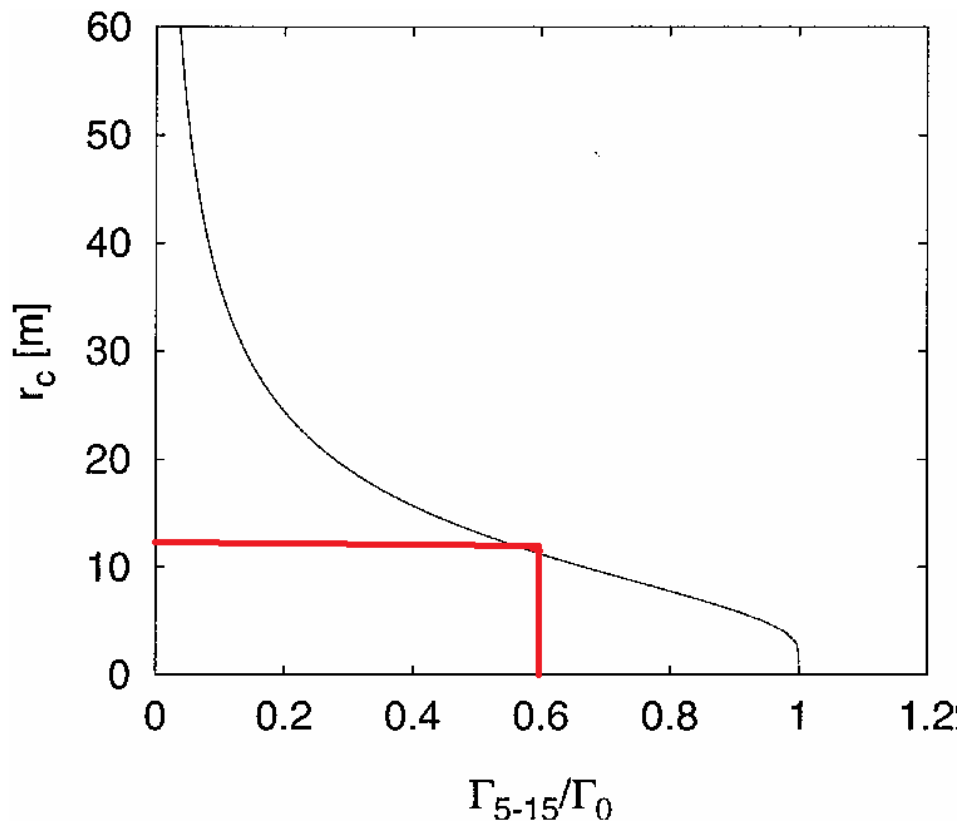
Obrázek 40: Vztah normalizované rychlosti a normalizované cirkulace pro ideální rozstup vírů 25m (A380) pro $w_0=2,17$ m/s, $\Gamma_0 = 854,3$ m²/s, $N^*=0$ (b)

Z předešlých výpočtů vychází, že v čase $t^*=6,5$ ($t=188$ s), v první fázi difúze, byla síla úplavu $\Gamma_{5-15}^* = 0,6$ ($\Gamma_{5-15} = 512,58$ m²/s).

Z výše uvedeného grafu 40 je vidět, že v době, kdy je síla úplavu $\Gamma_{5-15}^* = 0,6$, je rychlost klesání úplavových vírů téměř konstantní, tzn. $w^* = w/w_0 = 1$. Z toho vyplývá, že rychlost klesání má stejnou hodnotu, jako rychlost počátečního klesání, čili 2,17 m/s.

Když se podíváme na obrázek 39, tak taktéž vidíme, že křivka znázorňující vztah vertikální vzdálenosti a času je téměř lineární.

Tuto hodnotu sestupné rychlosti w^* lze spočítat i numericky. Hodnota ideálního poloměru jádra víru je v tomto případě $r_c=12,5$ m, viz níže.



Obrázek 41: Ideální poloměr jádra víru $r_c=12,5\text{m}$ v hodnotě $\Gamma_{5-15}^* = 0,6$ a při $\Gamma_0 = 854,3 \text{ m}^2/\text{s}$

Jak hodnotu pro ideální rozstup víru, tak hodnotu pro ideální poloměr jádra víru $r_c=12,5\text{m}$ je třeba použít pro výpočet sestupné rychlosti:

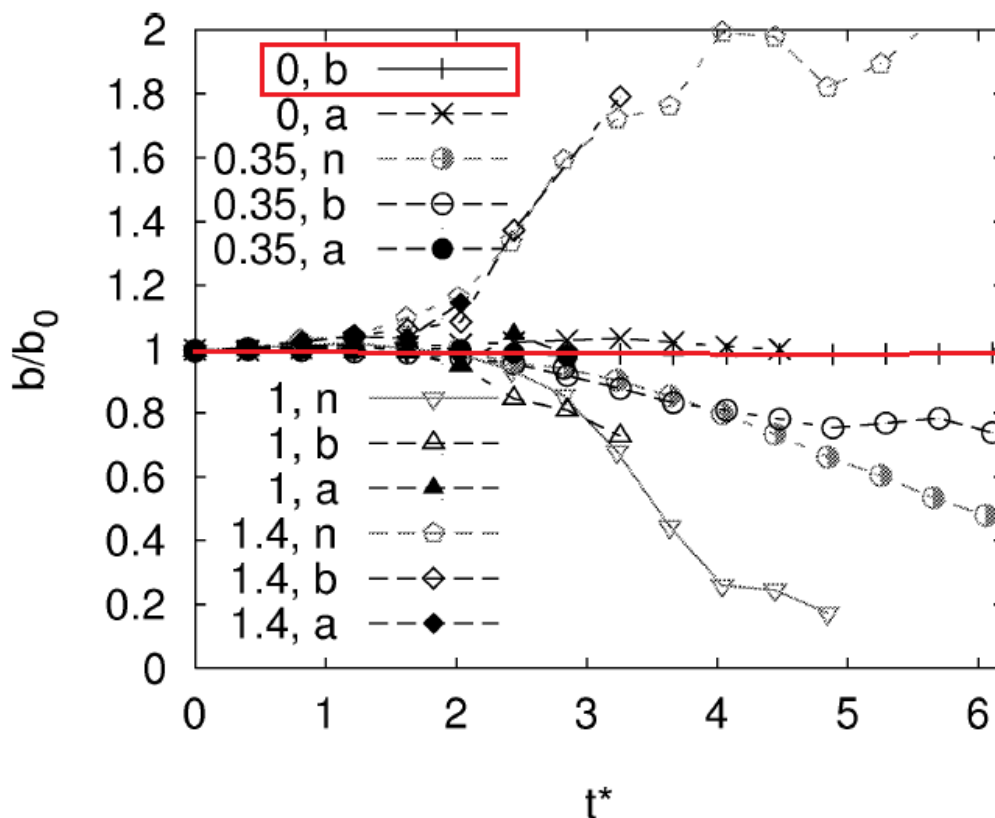
$$w^* = 1 - \exp(-1.257b^2/r_c^2) \quad (26)$$

$$w^* = 1 - \exp\left(-1.257 \frac{25^2}{12,5^2}\right) = 0,99 \quad (26)$$

Z výpočtu lze vidět, že normalizovaná sestupná rychlost úplavových víru vychází 0,99 (téměř 1), což vyplývá i z uvedeného grafu 40.

Jak už bylo v teorii zmíněno dříve, ideální rozstup vírů a ideální poloměr vírů jsou pouze hodnoty upravené tak, aby odpovídaly výsledkům LES simulací pro sestupnou rychlost.

Ve skutečnosti je rozstup vírů při klidných meteorologických podmínkách téměř identický jako počáteční rozstup vírů b_0 po celou dobu první fáze difúze.



Obrázek 42: Skutečný rozstup vírů v závislosti na čase pro $N^*=0$ a při $b_0=62,64m$

Z obrázku výše vyplývá, že skutečný rozstup vírů po celou dobu rozpadu bude přibližně 62,5m.

Co se týče poloměru jádra víru, tak tento poloměr nelze být nikdy s naprostou přesností předpovězen ani spočítán. Na základě všech měření a simulací (a po konzultaci s německými odborníky na atmosférickou fyziku Frankem Holzäpfelem a Judith Rosenow) bylo zjištěno, že poloměr jádra víru nabývá hodnot 3–4 % z rozpětí křídla. Jelikož A380 je největší dopravní letoun světa, budeme počítat s nejhorší možnou variantou – poloměr jádra víru bude nabývat 4 % z rozpětí křídla.

V našem případě je rozpětí křídla $B=79,75m$, tudíž poloměr jádra víru je $r_c=3,2m$. Průměr jednoho jádra víru bude tím pádem 6,4m.

Vnější poloměr víru r_v , na základě výzkumu dosahuje hodnoty až 12 % z rozpětí křídla, či-li přibližně $r_v=9,6m$.

Abychom si dokázali vůbec představit sílu takového úplavu letounu A380, kromě hodnoty počáteční cirkulace $\Gamma_0 = 854,3 \text{ m}^2/s$, si můžeme ještě na základě zjištěných hodnot poloměrů

vypočítat tangenciální rychlost (rychlost na „konci poloměrů“) podle *Hallock-Burnhamova* vztahu [1]:

$$v_{\theta(r)} = \frac{\Gamma_0}{2\pi r} \frac{r^2}{r^2 + r_c^2} \quad (27)$$

$$v_{\theta(r=9,6m)} = \frac{854,3}{2 \cdot \pi \cdot 9,6} \frac{9,6^2}{9,6^2 + 3,2^2} = 12,8 \text{ m/s}$$

Z výpočtu lze vidět, že tangenciální rychlost úplavu na vnějším poloměru víru je přibližně necelých 13 m/s.

Z teorie z druhé kapitoly víme, že tato hodnota na konci vnějšího poloměru víru je $\frac{1}{\sqrt{e}} v_{\theta(\max)}$ [13].

Ze vztahu:

$$v_{\theta(r)} = \frac{1}{\sqrt{e}} v_{\theta(\max)} \quad (28)$$

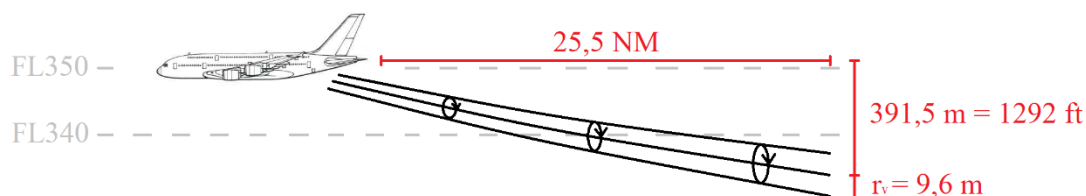
dostáváme:

$$v_{\theta(\max)} = v_{\theta(r)} \cdot \sqrt{e} \quad (29)$$

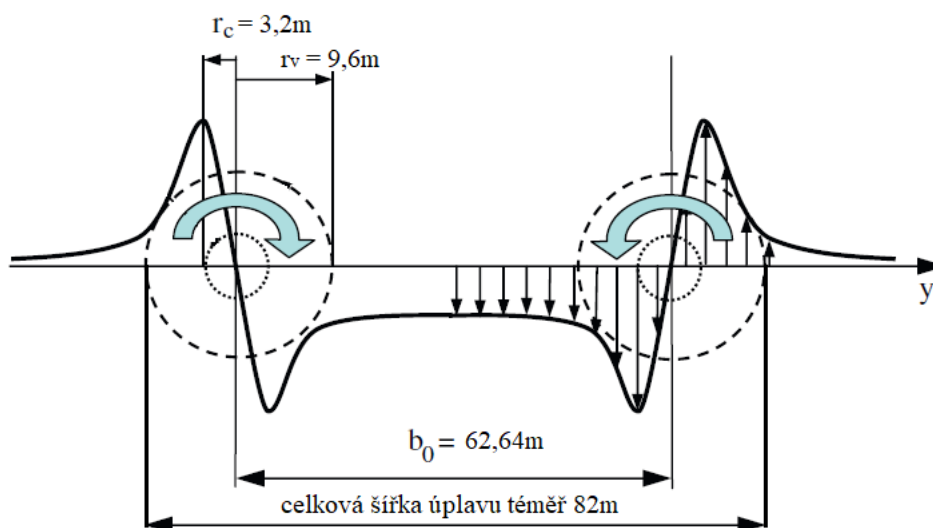
Proto hodnota maximální tangenciální rychlosti $v_{\theta(\max)}$, ze vztahu uvedeného výše na konci poloměru jádra víru, se rovná **21,1 m/s**.

Samozřejmě tyto hodnoty nelze spočítat s naprostou přesností z toho důvodu, že nelze přesně určit poloměr víru.

Níže na obrázku bude stručně nakreslen náčrt prostoru, který byl dosud spočítán až po dokončení první fáze difúze.



Obrázek 43: Náčrt bezpečnostního prostoru z profilu v první fázi rozpadu při klidných meteorologických podmínkách letounu A380, příklad letových hladin FL350 a FL340 (obrázek není v měřítku)

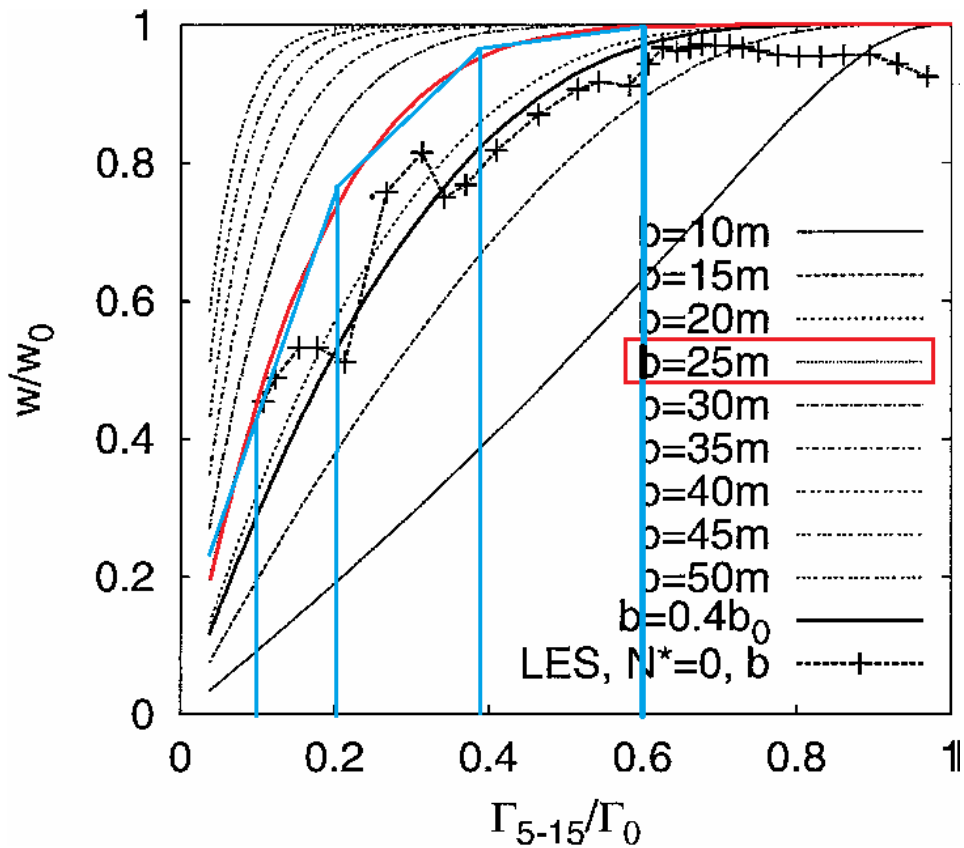


Obrázek 44: Náčrt bezpečnostního prostoru zezadu, celková šířka úplavu dosahuje přibližně 82m pro A380 v klidných meteorologických podmínkách

Pro **druhou fázi rychlého rozpadu** bohužel nemáme už část grafu 39, čili nevidíme, jak se úplav chová ve vertikálním směru v čase $t^*=12$, kdy se rozpadne úplně. Nicméně stále jsme schopni určit vertikální postup úplavových vírů ze zbylých dvou grafů 38 a 40.

Je možné z grafu 38 vyčíst, že v čase $t^*=12$ je síla úplavu Γ_{5-15}^* přibližně 0,1 (je to poslední naměřená hodnota, v našem případě pro $\Gamma_{5-15} = 85,43 \text{ m}^2/\text{s}$). V této fázi, kdy je normalizovaná síla úplavu 0,1, je normalizovaná rychlost klesání rovna přibližně $w^*=0,44$.

Jelikož má w/w_0 tvar exponenciální křivky, je velice obtížné takto zjistit, o jakou vzdálenost úplav ve druhé fázi klesl. Proto, pro jednoduchost výpočtu, je křivka rozdělená do 3 dílů, které představují rovnoměrně zpomalený pohyb, a lze z nich pomocí základních fyzikálních vztahů zjistit vzdálenost, kterou úplavové víry za daný čas urazí (viz obrázek níže).



Obrázek 45: Rozdělení grafu pro normalizovanou sestupnou rychlost vírů na 3 části

Z předchozích výpočtů víme, že počáteční rychlost klesání vírů na konci první fáze (a tudíž na počátku fáze druhé) je $w^*=1$, normalizovaná síla úplavu je 0,6 a ideální poloměr jádra víru (“an effective vortex radius”) je $r_c = 12,5\text{m}$.

Z obrázků 41 a 45 je možné zjistit potřebné hodnoty pro výpočet w^* podle vztahu níže:

$$w^* = 1 - \exp(-1.257b^2/r_c^2) \quad (30)$$

V dalším našem zvoleném bodě – kdy je normalizovaná síla úplavu $\Gamma_{5-15}^* = 0,39$ je ideální poloměr jádra víru přibližně $r_c=15\text{m}$. Tuto hodnotu dosadíme do vztahu 20 společně s $b=25\text{m}$ a dostáváme:

$$w^* = 1 - \exp\left(-\frac{1,257 \cdot 25^2}{15^2}\right) = 0,97$$

Vidíme, že hodnota $w^*=0,97$ odpovídá i obrázku 45 výše.

Tímto způsobem si zjistíme i hodnoty normalizované sestupné rychlosti vírů ve zbylém bodě pro $\Gamma_{5-15}^* = 0,2$. Obdobným postupem dostáváme hodnotu $r_c=23,5\text{m}$, a tudíž $w^*=0,76$.

Víme, že druhá fáze rychlého rozpadu trvá celkově přibližně 159s ($t_{2.fáze}^* = 12 - 6,5 = 5,5$).

Časy jednotlivých částí zjistíme opět z obrázku 38.

Níže v tabulce jsou znova sepsány všechny údaje ohledně klesání úplavu ve druhé fázi rozpadu potřebné pro výpočet poklesu.

w^*	w [m/s]	r_c [m]	Γ_{5-15}^*	Γ_{5-15} [m ² /s]	t^*	t [s]
1	2,17	12,5	0,6	512,6	6,5	188
0,97	2,1	15	0,39	333,2	8,5	246
0,76	1,65	23,5	0,2	170,9	10,5	303
0,44	0,95	37	0,1	85,4	12	347

Tabulka 16: Hodnoty pro výpočet vertikálního sestupu úplavu ve druhé fázi

Nyní, když je graf rozdělen do 3 částí, si jednoduchými fyzikálními výpočty rovnoměrně zpomaleného pohybu určíme vzdálenost, kterou úplav od počátku druhé fáze až téměř do rozpadu urazí.

ČÁST 1:

- Část mezi $\Gamma_{5-15}^* = 0,6 - 0,39$
- Čas: $t = 246 - 188 = 58s$

$$a_1 = \frac{w_2 - w_1}{t_2 - t_1}$$

$$a_1 = \frac{2,1 - 2,17}{246 - 188} = -0,0012 \text{ m/s}^2$$

$$s_1 = w_1 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a_1 \cdot t^2$$

$$s_1 = 2,17 \cdot 58 + \frac{1}{2} \cdot (-0,0012) \cdot 58^2 = 124 \text{ m}$$

Z průměrného výpočtu vychází, že úplav klesl o dalších 124m v námi zvolené první části. Obdobným způsobem spočítáme i další zbylé 2 části.

ČÁST 2:

- Část mezi $\Gamma_{5-15}^* = 0,39 - 0,2$
- Čas: $t = 303 - 246 = 57s$
- $s_2 = 107 m$

ČÁST 3:

- Část mezi $\Gamma_{5-15}^* = 0,2 - 0,1$
- Čas: $t = 347 - 303 = 44s$
- $s_3 = 57 m$

Když sečteme vertikální vzdálenosti všech 3 částí až do úplného rozpadu, vychází nám, že úplav ve druhé fázi rozpadu sklesá o dalších **288 m** (950 ft).

Když připočteme 1292 ft z první fáze úplavu a 950 ft z druhé fáze úplavu, vyjde nám, že úplav letounu A380 v klidných podmínkách dokáže sklesat přibližně až **2242 ft** pod aktuální letovou hladinu, to znamená, že zasahuje i do další letové hladiny o 2000 stop níže (odpovídá i studii IATA databázi STEADES).

S poslední nejmenší cirkulací $\Gamma_{5-15} = 85,43 m^2/s$ před úplným rozpadem jsme počítali proto, protože jednak $\Gamma_{5-15}^* = 0,1$ je poslední naměřená hodnota v rámci LES simulací (viz obrázek 38) a také, protože je tato hodnota cirkulace menší než ten nejmenší práh cirkulace pro letadlo nejnižší kategorie.

V praxi, cirkulace pod určitou hodnotu může být považována už za neškodnou pro určitý typ letadla. Jak už bylo zmíněno dříve, větší dopravní letadla snášejí silnější turbulence lépe, než ty menší a lehčí letadla. Proto byl zaveden **práh cirkulace**, při jejímž překročení už nehrozí velké nebezpečí letadlu, které jím proletí.

Proto na základě měření byla pro všech 6 kategorií letadel v rámci (CAT A-F) zjištěna určitá hodnota prahu cirkulace. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce níže.

KATEGORIE LETADEL (RECAT)	PRÁH CIRKULACE Γ_{5-15} [m ² /s]
A	250
B	250
C	200
D	125
E	100
F	100

Tabulka 17: Práh cirkulace pro jednotlivé kategorie letadel [8]

Z tabulky lze vidět, že i ten největší dopravní letoun světa A380 snese maximální cirkulaci 250 m²/s. Z předchozího výpočtu víme, že v době, kdy úplav dosáhne konce první fáze difúze a sklesá vertikálně pod 1000 ft, síla cirkulace je stále přes 500 m²/s, což je nebezpečné, i kdyby tím proletěl další Airbus A380.

Z dosavadních znalostí a výpočtů lze usoudit, že při klidných meteorologických podmínkách by vůbec nemělo být žádnému letadlu povoleno letět na vstříčných tratích ve vertikální vzdálenosti 1000 ft!

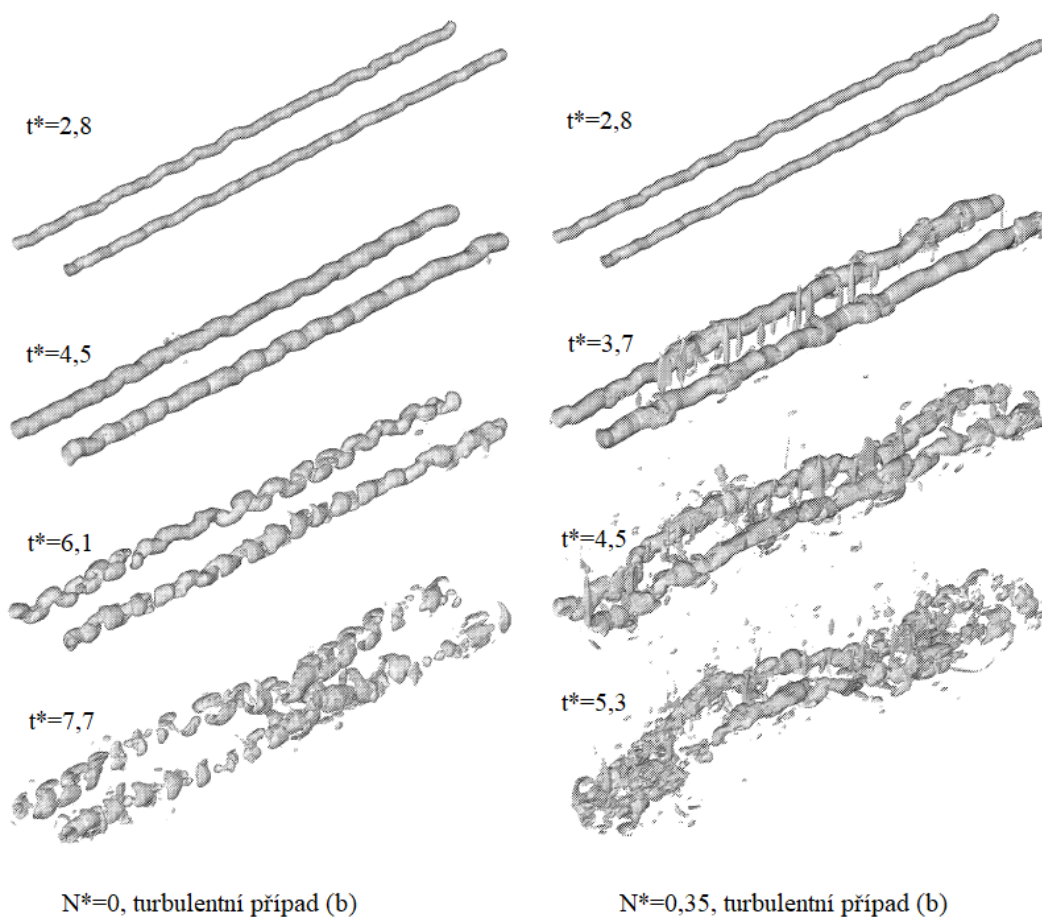
Z databáze STEADES vyplývá, že došlo i k případům, kdy došlo k nahlášení vlétnutí do úplavu ve vertikální vzdálenosti 2000 ft. Po výpočtech v této relativní výšce je v klidných meteo podmínkách cirkulace A380 okolo 300 m²/s, což stále překračuje práh cirkulace i pro A380. Challenger CL604 spadá do té nejnižší kategorie F.

Je také důležité si uvědomit, že hodnota počáteční cirkulace Γ_0 (a tím i další hodnoty cirkulace v jednotlivých časových okamžicích) se odvíjí od aktuální hmotnosti, rychlosti a konfiguraci (cestovní) letadla, hustotě vzduchu a tak dále. Takže také se každým okamžikem cirkulace pro každé letadlo mění.

Nicméně tato vypočítaná vertikální vzdálenost 2242 ft a síla úplavu v této výšce není zcela přesná. Důvodem je určení rychlostí klesání úplavu ve druhé fázi, kdy rychlost klesá exponenciálně a graf musel být rozdělen do tří částí. Navíc, jelikož se jedná o klidné meteorologické podmínky bez turbulencí, je toto nejhorší možný případ sestupu úplavu, který může nastat. V ostatních

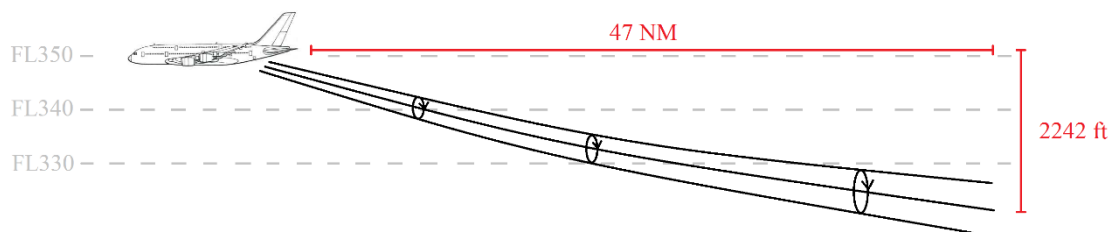
případech, kdy by bylo ovzduší trochu turbulentní, by už úplav tak nízko sklesat nemusel. Proto bude později ještě jako příklad vypočítán případ pro mírně turbulentní prostředí.

Co se týče poloměrů jádra víru, tak v druhé fázi rychlého rozpadu jsou jádra sice stále ještě relativně silná, ale už dochází ke slučování jader a jejich rozpadu, viz obrázek 13. Níže na obrázku jsou znázorněny jádra vírů ze simulací a z měření, které se s časem postupně rozpadají. Je zde vidět, že při nulové stratifikaci (Brunt-Väisälä frekvence=0), nebo-li při klidném ovzduší se víry rozpadají pomaleji (setrvávají déle), než při turbulentním ovzduší (vyšší BV frekvence).



Obrázek 46: Časový vývoj jader úplavových vírů při normalizované stratifikaci $N^*=0$ a $0,35$, případ (b) [11]

Na obrázku níže je stručně nakreslena oblast úplavu vypočítaná i ve druhé fázi. Je třeba připomenout, že obrázek není v měřítku a ani jádra vírů zde nejsou zakresleny do detailu ve fázi rozpadu.



Obrázek 47: Náčrt bezpečnostního prostoru z profilu po druhé fázi rozpadu při klidných meteorologických podmínkách letounu A380, příklad letových hladin FL350, FL340 a FL330 (obrázek není v měřítku)

6.5 Výpočet úplavu letounu A380 v turbulentnějších podmínkách

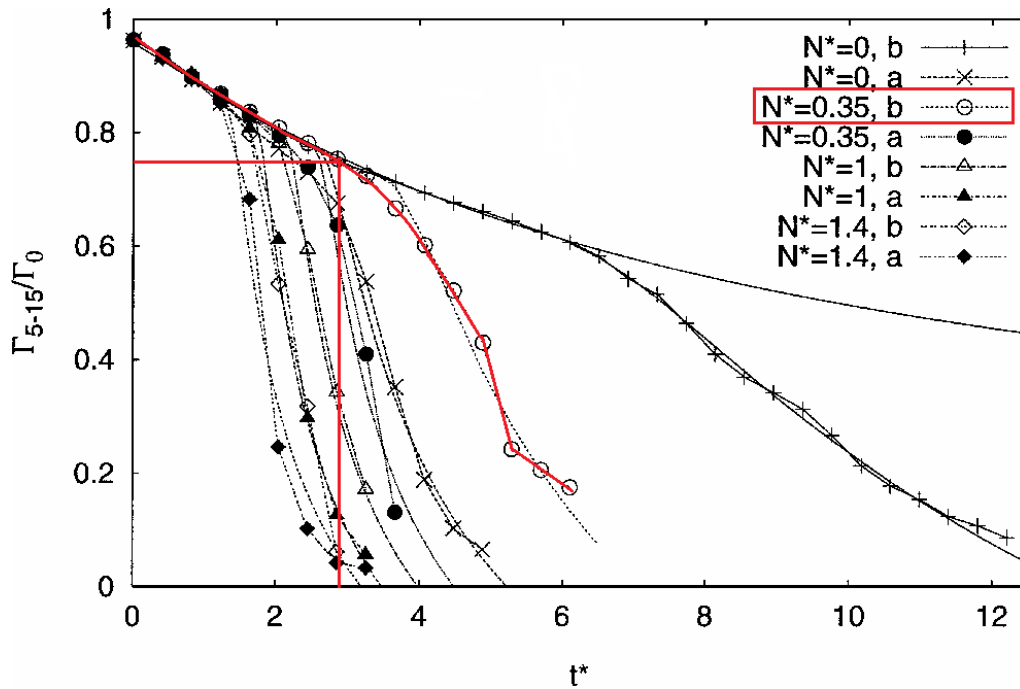
V dosavadních výpočtech předchozí kapitoly jsme uvažovali normalizovanou stratifikaci (BV frekvenci) $N^*=0$. To je ten nejhorší možný případ vývoje úplavu za letadlem v atmosféře.

Nyní si jen pro představu rychle a stručně vypočítáme vývoj a rozpad úplavu v turbulentnějším prostředí.

Airbus A380 bude mít stejnou konfiguraci jako v předchozích výpočtech, to znamená stejnou hmotnost, rychlost i výšku. Taktéž původní spočítané hodnoty b_0 , t_0 , w_0 a I_0 zůstávají stejné.

Jelikož v této diplomové práci počítáme úplav podle P2P modelu od Franka Holzeapfela, taktéž budeme uvažovat jeho vztahy a grafy. V následujících výpočtech budeme počítat úplav v prostředí s $N^*=0,35$.

Ze vztahu $N^*=N \cdot t_0$ si můžeme spočítat, že pro $t_0=28,9s$ se hodnota Brunt-Väisälä frekvence rovná $N=0,012s^{-1}$.



Obrázek 48: Určení normalizované cirkulace na konci fáze difúze pro $N^*=0,35$ (b) a při $\Gamma_0 = 854,3 \text{ m}^2/\text{s}$

Z obrázku výše je vidno, že v prostředí s normalizovanou stratifikací $N^*=0,35$ dochází ke druhé fázi rychlého rozpadu už přibližně v čase $t^*=2,9$ (tzn. po době přibližně **84s** po průletu) a z naměřených hodnot vidíme, že poslední měřená hodnota cirkulace je zachycena až v čase $t^*=6$ (cca **174s** po průletu).

Z grafu je taktéž vidět, že pro všechny hodnoty BV frekvence se úplav nejdříve rozpadá úplně stejně, a čím vyšší N^* , tím dříve úplav přejde do druhé fáze rychlého rozpadu.

V tomto případě je hodnota normalizované cirkulace na konci první fáze difúze přibližně $\Gamma_{5-15}^* = 0,75$, což odpovídá síle úplavu asi $\Gamma_{5-15} = 641 \text{ m}^2/\text{s}$, a na konci druhé fáze odpovídá poslední naměřená hodnota síle $\Gamma_{5-15} = 171 \text{ m}^2/\text{s}$.

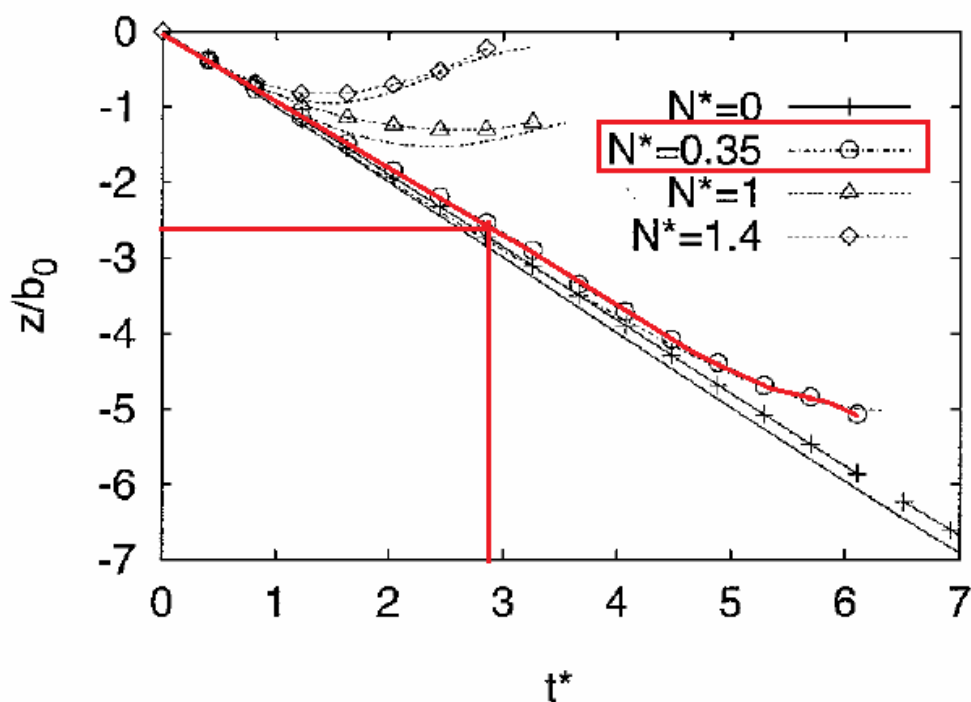
Pro výpočet horizontální vzdálenosti úplavu v obou fázích opět použijeme jednoduchý vztah:

$$s = v \cdot t = 251 \cdot 84 = 21\,084 \text{ m} = \mathbf{11,3 \text{ NM}}$$

Úplav na konci první fáze dosahuje až **11,3 NM** za letadlo A380. Na konci druhé fáze po 174 sekundách bude úplav ve vzdálenosti až **23,6 NM** (43 674 m). Je vidět z prvních výpočtů, že se

úplav při $N^*=0,35$ rozpadá mnohem rychleji a dosahuje dvakrát kratší vzdálenosti za A380, než při $N^*=0$.

Dále si zjistíme z grafu níže vertikální vzdálenost úplavu od letadla v $N^*=0,35$, nebo-li o kolik úplav celkově sklesal.

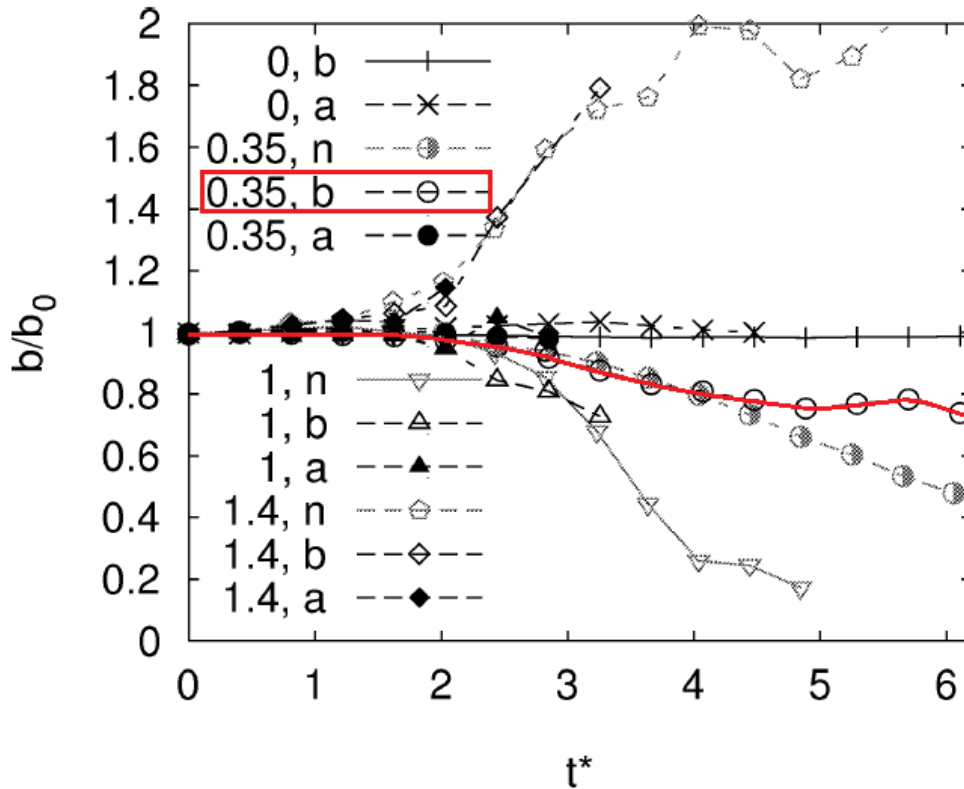


Obrázek 49: Určení vertikální vzdálenosti vírů na konci fáze difúze pro $N^*=0,35$ a při $b_0=62,64m$

Z grafu je vidět, že konci první fáze $t^*=2,9$ odpovídá hodnota z/b_0 přibližně 2,6. To znamená jinými slovy, že po 84 sekundách úplavové víry sklesaly pouhých 163 m, nicméně poté mají téměř stejnou sestupnou tendenci až do doby přibližně $t^*=4,5$, kde už rychlost sestupu klesá. Na rozdíl od prvního případu pro $N^*=0$, zde máme zachycenou kompletní sestupnou tendenci úplavu, tedy i ve druhé fázi rychlého rozpadu. Po **174 sekundách** ($t^*=6$) a ve vzdálenosti **23,6 NM** úplav sklesá přibližně **313 m (1033 ft)** a v této fázi je silný přibližně **171 m²/s**, což je podle tabulky pro práh cirkulace stále ještě nebezpečné pro letadla kategorie D, E a F.

Z dosavadního výpočtu je možné vidět, že i při turbulentnějších atmosférických podmínkách dokáže úplav A380 sklesat do nižší letové hladiny o 1000 ft níže.

Co se týče rozstupu víru, tak opět můžeme použít už dříve zmíněný graf, tentokrát zase budeme počítat s křivkou pro $N^*=0,35$.



Obrázek 50: Skutečný rozstup vírů v závislosti na čase pro $N^*=0,35$ a při $b_0=62,64m$

Při BV frekvenci $N=0,012s^{-1}$ ($N^*=0,35$ a případu b, kdy pouze letadlem vyvolané turbulence ovlivňují víry) vidíme, že rozstup víru téměř po celou dobu první fáze difúze je stejný, jako počáteční rozstup vírů, tj. cca 62m, a poté se začne rozstup mírně zmenšovat až na hodnotu kolem 50 metrů ($b/b_0=0,8$).

Co se týče poloměru jádra víru, tak stále platí to, že se hodnota poloměru jádra odpovídá 3-4 % z rozpětí, ale stále nelze tuto hodnotu s přesností předpovědět. Obzvláště, když už se víry začínají v turbulentnějším prostředí dříve rozpadat. Jak přesně takový rozpad vírů vypadá při $N^*=0,35$, můžeme vidět z obrázku 43.

Obdobným způsobem podle tohoto P2P modelu se dá vypočítat úplav každého letadla i při turbulentnějších podmínkách, a v každém případě by vypadal prostor, kam by neměla být letadla vpuštěna, trochu jinak.

6.6 Vliv větru a stručný rozbor nehody CL604 ze 7.1.2017

Je známo z pokusů a měření, jak už bylo řečeno dříve, že vítr nemá žádný vliv na rychlost rozpadu úplavu. Pouze ho v horizontálním směru posouvá a stříh větru i ve vertikálním směru. Navíc bylo zjištěno, že pokud vítr vane proti směru letu letadla (tzv. „*headwind*“), tak tento vítr snižuje rychlost klesání úplavových vírů. Naopak, pokud při letu vane vítr ve směru letu letadla, (tzv. „*tailwind*“), tento vítr dopomáhá v klesání úplavu, neboli zvyšuje sestupnou tendenci úplavu. [32]

Z toho důvodu je třeba počítat se snosem větru a předpokládat, že se úplavové víry nemusí držet v rovině letu a mohou být sneseny více vpravo nebo více vlevo od trati.

V kapitole 4 už je určitým způsobem popsána nehoda tohoto Challengeru 604.

Jak už bylo zmíněno dříve, vítr v době nehody v letové hladině FL 350 foukal ze směru 315° rychlostí 23 kt. Airbus 380 od traťového bodu DONSA letěl přibližně kursem 143° k bodu GOLEM po trase L984.

Z toho vyplývá, že vítr vanul mírně zprava „do zad“ ve směru letu A380, a tudíž byla veliká pravděpodobnost, že úplav A380 nebude nikam daleko snášen a udrží se v následující minutě v trase za A380.

Posádka bizjetu také upozornila, že je Airbus minul zleva, což odpovídá i teorii, že by vítr mohl úplavové víry snést přímo do letové trati bizjetu.

V našich výsledcích pro $N^*=0$ jsme spočítali, že úplavové víry budou v horizontální vzdálenosti kolem 25 NM přibližně 1300 ft pod A380, a poté se začínají rychle rozpadat.

Jestliže si budeme chtít spočítat přibližnou hodnotu horizontální vzdálenosti úplavu v relativní výšce pouze 1000 ft, bude potřeba se opět podívat na obrázek 39. Hodnota $z/b_0=4,75$ odpovídá hodnotě 298 m, což je přibližně 1000 ft. Odtud vidíme na ose y i čas $t^*=4,8$, z kterého nám vychází horizontální vzdálenost úplavu cca 18,7 NM.

Ve skutečnosti, v době zasažení úplavem, se bizjet nacházel podle záznamu přibližně 15 NM za A380. Tuto nepřesnost způsobuje výrazný vliv větru. Vítr „do zad“ letadla A380 urychluje sestupnou rychlost úplavových vírů, což také vysvětluje, proč bizjet do úplavu nalétnul rychleji než ve výpočtu v bezvětří. Také ani není známa přesná rychlost bizjetu CL604, pouze v této práci předpokládáme, že letěl stejně rychle jako A380.

Samozřejmě není možné s naprostou přesností předpovědět v atmosféře žádný úplav přesně na sekundy, ani na metry.

6.7 Náčrt bezpečnostního prostoru za A380

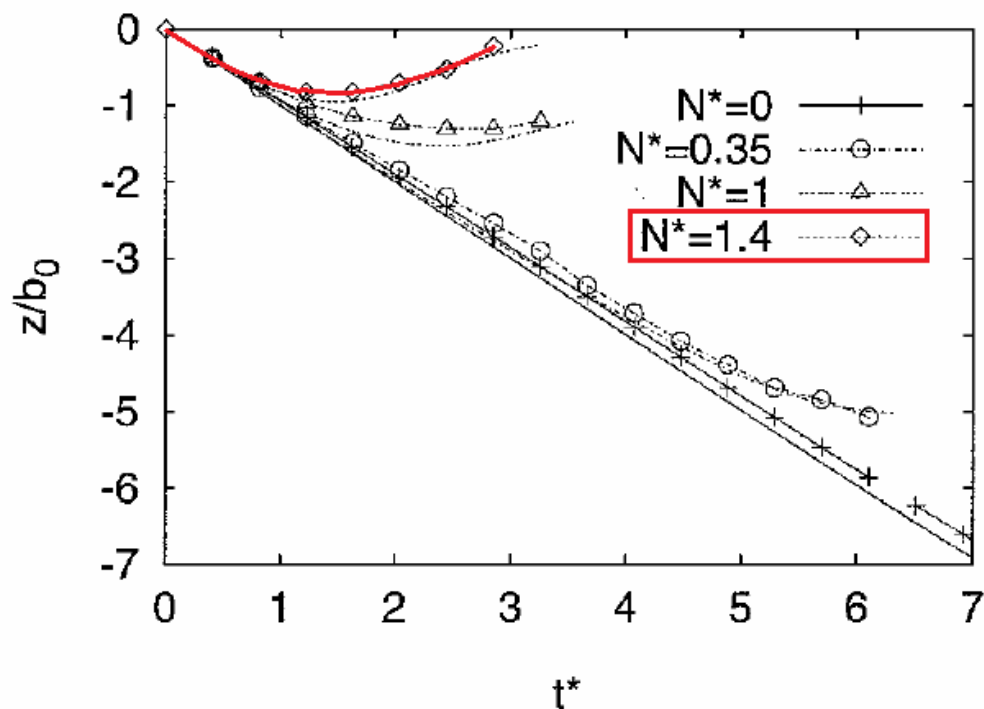
V této podkapitole budou stručně shrnuty všechny dosavadní výpočty a znalosti úplavu. Budou zde načrtnuty bezpečnostní prostory pro jednotlivé relativní letové hladiny i s vlivem větru.

Je potřeba znovu připomenout, že všechny dosavadní výpočty byly počítány pro letoun A380 s hmotností 522 900 kg, letící cestovní rychlostí 490 kt v letové hladině FL350.

6.7.1 Bezpečnostní prostor ve stejné letové hladině

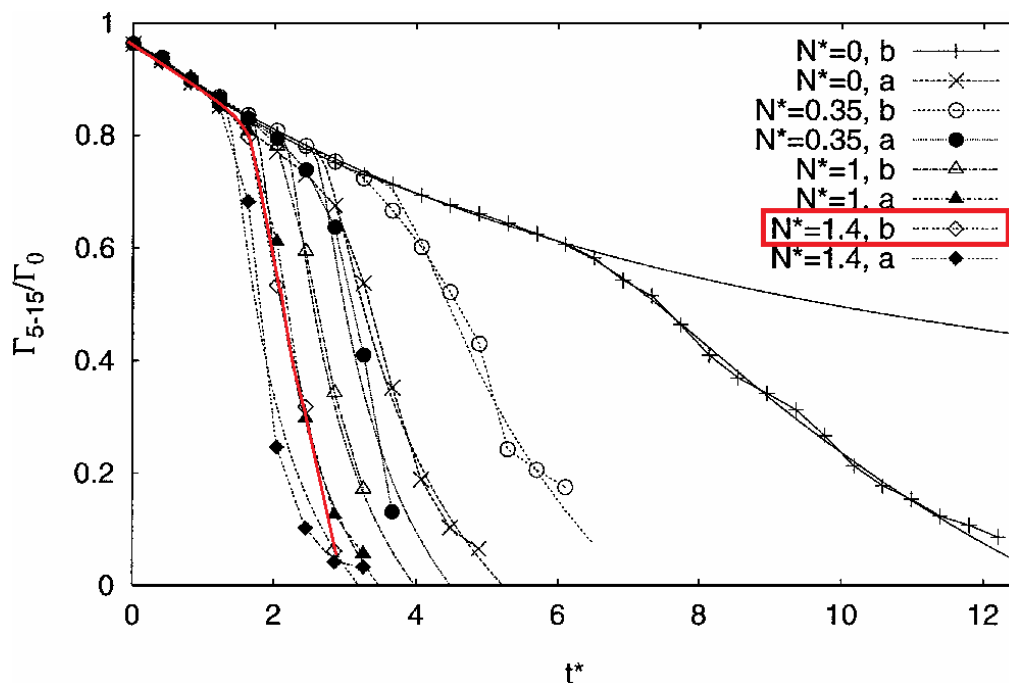
V minulých podkapitolách bylo matematicky dokázáno, že úplav dokáže sklesat v klidných i mírných turbulentních podmínkách o 1000 ft níže, což by teoreticky znamenalo, že horizontální rozstup 5 NM pro A380 je dostačující, protože v té vzdálenosti se už úplav ve stejné letové hladině vyskytovat nebude.

Nicméně, když se podíváme na graf 51 níže, vidíme, že pro vysoce turbulentní prostředí ($N^*=1,4$ (b), v našem případě $N=0,05s^{-1}$) křivka neklesne níže, než $z/b_0=1$ ($z=62,64m$). Úplav prakticky nijak výrazněji neklesá a ihned se rozpadá.



Obrázek 51: Určení vertikální vzdálenosti vírů na konci fáze difúze pro $N^*=1,4$ a při $b_0=62,64m$

V takovém případě je potřeba zkontrolovat, zda je horizontální rozstup 5 NM dostatečný. K tomu budeme potřebovat opět známý graf níže.



Obrázek 52: Určení normalizované cirkulace na konci fáze difúze pro $N^*=1,4$ (b) a při $\Gamma_0 = 854,3 \text{ m}^2/\text{s}$

Nyní budeme používat pouze grafy 51 a 52, které jsou dostačující. Z obrázku 51 je vidět, že úplav setrvává až do doby téměř $t^*=3$ (v našem případě do doby 87 s po průletu). Na obrázku 52 ale hodnota cirkulace pro $t^*=3$ je pod 0,1 (v našem případě $\Gamma_{5-15} = 85,43 \text{ m}^2/\text{s}$). Tato hodnota je ale menší, než ten nejmenší práh cirkulace $100 \text{ m}^2/\text{s}$ pro kategorii F. Proto je potřeba určit hodnoty normalizované cirkulace Γ_{5-15}^* pro všechny prahy.

Níže v tabulce jsou sepsány všechny důležité hodnoty pro výpočet horizontálního rozstupu pro každou kategorii letadla, který je zobrazen v posledním sloupci tabulky.

Příklad: Letadlům kategorie B ("Upper Heavy") odpovídá práh cirkulace $\Gamma_{5-15} = 250 \text{ m}^2/\text{s}$, tudíž normalizovaný práh cirkulace je $\frac{\Gamma_{5-15}}{\Gamma_0} = 0,3$. Této hodnotě 0,3 odpovídá v grafu 52 časová hodnota přibližně $t^*=2,5$ ($t^*=t/t_0 \Rightarrow t=72 \text{ s}$). Jelikož předpokládáme, že A380 letí cestovní rychlostí cca 488kt, což je v přepočtu přibližně 251 m/s, tak vzdálenost, ve které může letět další letadlo kategorie B, je kolem 9,8 NM.

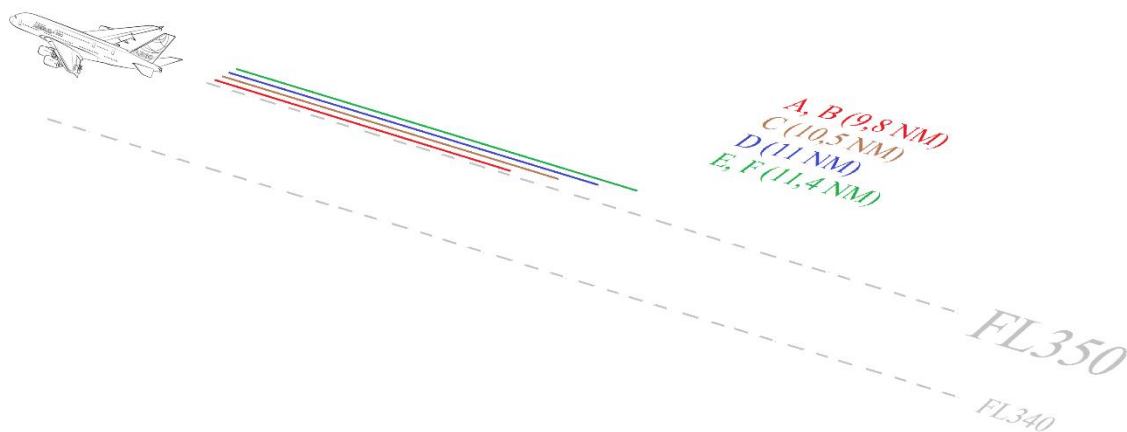
KATEGORIE LETADEL	PRÁH CIRKULACE Γ_{5-15} [m ² /s]	NORMALIZOVANÝ PRÁH CIRKULACE $\frac{\Gamma_{5-15}}{\Gamma_0}$	NORMALIZOVANÝ ČAS $t^*=t/t_0$	ČAS $t=t^* \cdot t_0$ [s]	MIN. ROZSTUP ZA A380 [NM]
A	250	0,3	2,5	72	9,8
B	250	0,3	2,5	72	9,8
C	200	0,23	2,7	78	10,5
D	125	0,15	2,8	81	11
E	100	0,12	2,9	84	11,4
F	100	0,12	2,9	84	11,4

Tabulka 18: Výpočet minimálních rozstupů za A380 pro jednotlivé kategorie letadel, při $\Gamma_0 = 854,3 \text{ m}^2/\text{s}$, $v=251 \text{ m/s}$ a $t_0=28,9\text{s}$

Z tabulky je vidět, že v momentě, kdyby panovaly turbulentnější podmínky a úplav by neklesal rychle, není vyhovující, aby za A380 ve vzdálenosti 5 NM letělo hned další letadlo. V případě dalšího letounu A380 by měla být vzdálenost 10 NM a pro ty nejmenší letadla až cca 12 NM.

Dříve se v České republice uvažovalo také o horizontální separaci pro A380 až 15 NM, z tohoto plánu ale nakonec z blíže nespecifikovaných důvodů sešlo. [14]

Co se týče snosu větru, tak pokud vítr vane ve směru/proti směru letové tratě, nemusíme snos větru uvažovat.



Obrázek 53: Minimální horizontální rozstupy jednotlivých kategorií letadel A-F ve stejné letové hladině v bezvětří/při větru ve směru trati (obrázek není v měřítku)

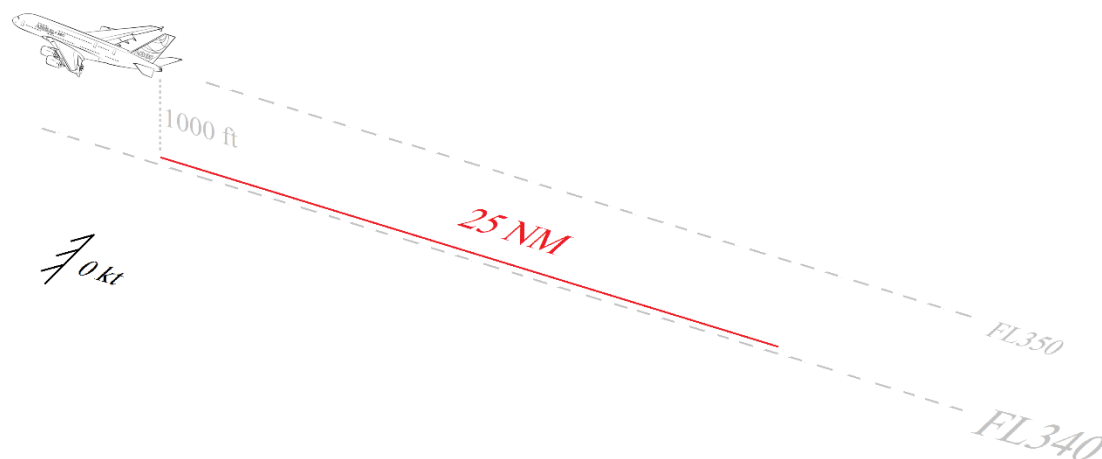
Jestliže bude foukat boční vítr, řídící letového provozu by měli letadla navádět spíše na návětrnou stranu, jelikož je velké riziko snosu úplavu po větru. V takhle velkých letových hladinách má vítr sílu průměrně 50 – 100 kt. Jelikož jsou časové rozstupy přibližně 1,5 minuty, lze předpokládat, že úplav může být za tuto dobu snesen 1,2 - 2,5 NM (podle síly větru) mimo letovou trať.

6.7.2 Bezpečnostní prostory v nižší letové hladině

Jak vyplývá z předchozí podkapitoly, do letové hladiny o 1000 stop níže se dostane úplav v bezturbulentním nebo mírně turbulentním prostředí. Ze statistik databáze STEADES od IATA vyplývá, že nejkritičtější případy se stávají s vertikálním rozstupem 1000 stop do horizontální vzdálenosti až 20 NM. Jelikož úplav nelze nikdy s naprostou přesností předpovědět a atmosféra je nevyzpytatelná, docházelo i k případům, kdy byl úplav nalétnut i blíže, než 10 NM za letadlem (a ani letadlo produkující úplav nemuselo být A380).

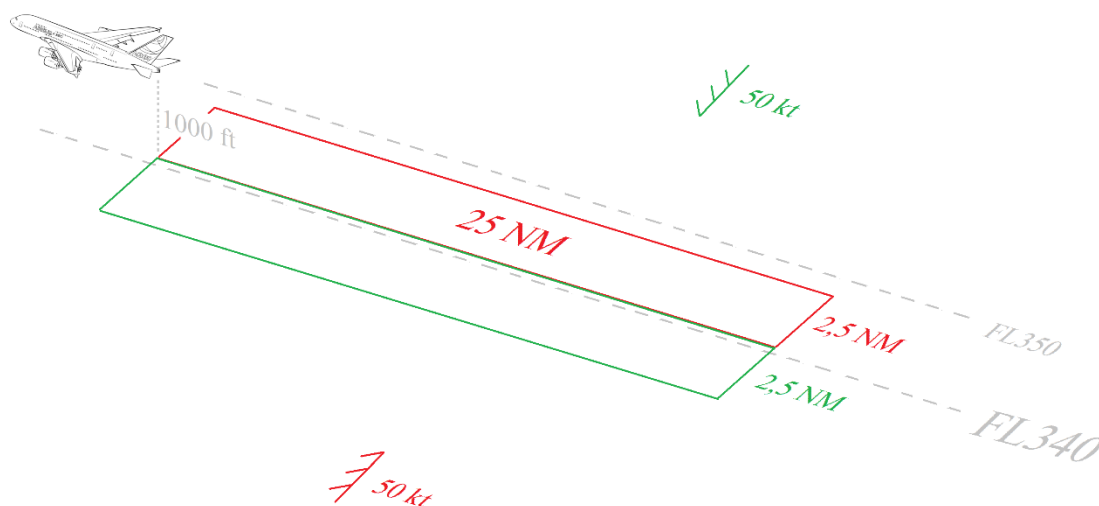
Proto níže nakreslené bezpečnostní prostory jsou na základě výpočtů a statistik to nejbezpečnější řešení, které by měly být uplatněny v případě provozu A380.

Z obrázku 43 a z kapitoly 6.5 vychází, že jak v klidných, tak v mírně turbulentních podmínkách dosahuje úplav o 1000 ft níže, až kolem 25 NM.

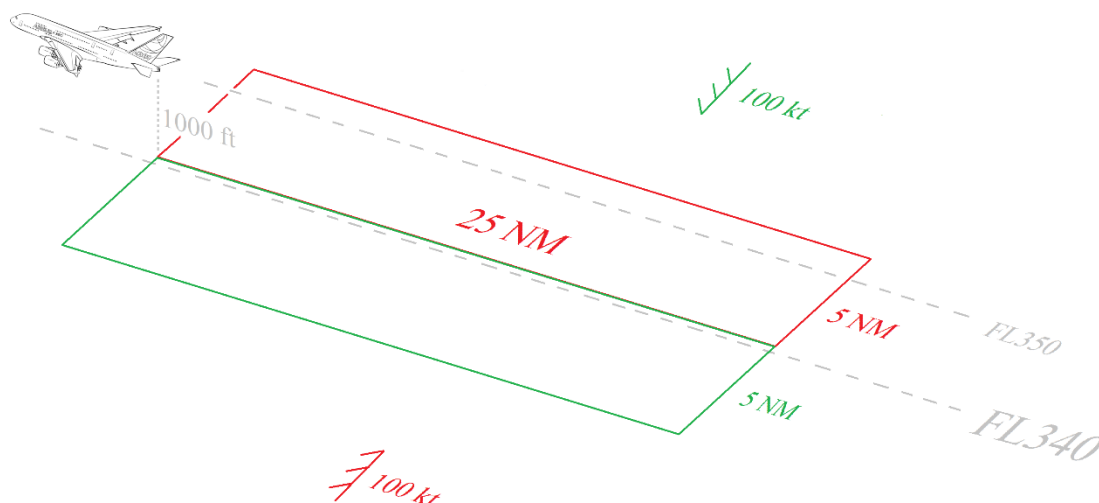


Obrázek 54: Bezpečnostní prostor v nižší letové hladině (zde zachyceny letové hladiny 350 a 340) v bezvětrí

Ve vysokých cestovních hladinách kolem FL300 až FL400 se vítr pohybuje běžně v hodnotách 50 kt až třeba i 100 kt. Na dalších obrázcích níže budou zobrazeny bezpečnostní prostory se směry větru orientovanými přímo „z boku“ ve směru letu A380 o síle 50 kt a 100 kt. Vítr o této síle dokáže snést úplav během tří minut o 2,5 NM až 5 NM.



Obrázek 55: Bezpečnostní prostor 3D v nižší letové hladině (zde zachyceny letové hladiny 350 a 340) s bočním větrem 50kt z obou stran



Obrázek 56: Bezpečnostní prostor 3D v nižší letové hladině (zde zachyceny letové hladiny 350 a 340) s bočním větrem 100kt z obou stran

Řídící letového provozu by proto měly být na pozoru, měli by mít informace o směru a síle větru, a v nižší letové hladině o 1000 ft až 25 NM za A380 by neměli pouštět z bezpečnostních důvodů žádné letadlo a pilotům vyhovět při žádostech o tzv. “off-set”. Lze předpokládat, že při přesně bočním větru bude úplav snesen mimo letovou trať A380, tudíž je žádoucí, aby podle síly větru

byla letadla naváděna na návětrnou stranu letové trati a nelétala do vyhrazené části tak, jak je zobrazeno na obrázcích výše.

Co se týče bezpečnostního prostoru v letové hladině o 2000 stop níže, bylo spočítáno, že při naprosto klidných meteorologických podmínkách odpovídá hodnota cirkulace úplavu A380 v této relativní výšce kolem $300 \text{ m}^2/\text{s}$, což překračuje práh cirkulace i pro tu největší kategorii letadel. Z databáze STEADES taktéž vyplývá, že došlo k hlášení, kdy letadlo vletlo do úplavu ve 2000 ft pod letovou rovinou od horizontální vzdálenosti 5 NM.

Z dřívějšího výpočtu vychází, že v relativní výšce 2242 stop pod letovou hladinu je síla úplavu $85,43 \text{ m}^2/\text{s}$ v horizontální vzdálenosti 47 NM. Síla úplavu při nejnižší hodnotě prahu cirkulace $100 \text{ m}^2/\text{s}$ vychází v horizontální vzdálenosti kolem 45 NM.

Tím pádem vychází, že **bezpečnostní prostor za A380 o dvě letové hladiny níže (tj. 2000 ft níže) by byl mezi 5 NM a 45 NM.**

Tyto hodnoty výše jsou nicméně spočítány pro klidné meteorologické podmínky. Při turbulentnějším stavu atmosféry je už málo pravděpodobné, že úplav sklesá o 2000 ft níže.

V dnešní době při velké snaze co nejvíce zvýšit kapacitu vzdušného prostoru je velice nepravděpodobné, že by se omezoval letový prostor o 2 letové hladiny níže. Navíc, i stav atmosféry je většinou alespoň mírně turbulentní.

Proto zůstává otázkou, zda nějaký bezpečnostní prostor o dvě letové hladiny níže vůbec navrhovat vzhledem k dodržení optimální kapacity vzdušného prostoru.

7. Závěr

V posledních několika letech počet letadel ve vzdušném prostoru narůstá a je potřeba stále vymýšlet nové postupy a nové rozstupy hlavně kvůli turbulenci v úplavu s cílem zajištění dostatečné kapacity letového prostoru.

Právě úplav je velice nebezpečný jev pro letadla a odvíjí se zejména od jejich hmotnosti, rozpětí a rychlosti letu. Z incidentů a nehod v poslední letech bylo zjištěno, že několika největším dopravním letadlům světa, včetně Airbusu A380, zasahuje úplav i do nižších letových hladin, což představuje značné nebezpečí. V této diplomové práci je podrobně popsán vývoj a rozpad úplavu pomocí pravděpodobnostního dvoufázového modelu od Franka Holzaepfela. Tento model zahrnuje všechny faktory, které mají velký vliv na životnost úplavových vírů, včetně turbulentního stavu atmosféry a vlivu větru.

Protože důvodem vzniku této diplomové práce je nehoda Challengera 604 s Airbusem A380 dne 7.1.2017, cílem bylo dokázat výpočtem podle P2P modelu, že úplav A380 v té době opravdu mohl zasahovat i do letové hladiny bizjetu, a tudíž RVSM není dostačující. Taktéž byly výpočtem potvrzeny statistiky IATA databáze STEADES, kdy docházelo k vlétnutí do turbulence u letadel s vertikální separací až 2000 stop, a bylo úkolem navrhnout odpovídající bezpečnostní prostory.

Všechny tyto cíle byl splněny a byly navrženy odpovídající horizontální rozstupy v jednotlivých letových hladinách v závislosti na A380.

Nicméně je potřeba znovu zdůraznit, že nelze předpovědět chování úplavu v atmosféře s naprostou přesností kvůli mnoha faktorům, jako je například stupeň rozpadu víru EDR, kinematická viskozita, Brunt-Väisälä frekvence N , nebo také vliv větru.

V této práci je také popsán postup výzkumu vlétnutí do úplavu na letadlech pomocí ADS-B dat (během pouhého jednoho měsíce nad oblastí České republiky), které by teoreticky mohly vlétnout do prostoru, kde se úplav A380 nacházel. Bohužel ani na jednom letadle nebyla nalezena žádná výraznější hodnota změny výšky nebo úhlu náklonu, která by odpovídala silné turbulenci v úplavu. To bylo pravděpodobně způsobeno turbulentním stavem atmosféry, kdy se úplav už rozpadl, nebo byl úplav větrem snesen mimo předpokládanou rovinu, jelikož směr a síla větru nebyla v průběhu výzkumu známa.

Nicméně jak statistiky IATA, tak nehody a incidenty z posledních let společně s výpočty v této práci dokazují, že úplav za A380 je nebezpečný a měly by být zavedeny od složek ŘLP určité postupy, které by dalším nehodám zabránily.

Myslím, že tato diplomová práce je užitečná jak pro piloty, tak pro řídící letového provozu, protože všichni by měli perfektně chápat vývoj úplavu a měli by si být vědomi tohoto nebezpečného jevu. Obzvláště, když je to jev neviditelný.

Já sám musím uznat, že jakožto pilotovi, studium podkladů a materiálů pro tuto diplomovou práci mi bylo velkým přínosem a doufám, že bude přínosem i pro bezpečnost letového provozu v budoucnu.

8. Seznam obrázků

Obrázek 1: Pohled zezadu na letadlo produkující víry úplavu, levý vír rotuje ve směru hodinových ručiček, pravý proti směru hodinových ručiček	11
Obrázek 2: Pohled zespod na simulaci letadla a jeho úplavu v blízkém poli do pětinasobné vzdálenosti jeho rozpětí "B". [3]	12
Obrázek 3: Rozstup vírů elipticky zatíženého křídla [4]	14
Obrázek 4: Cirkulace ze simulací LES a odpovídající výsledky P2P modelu pro různé scénáře turbulencí a stupně teplotního zvrstvení [5]	20
Obrázek 5: Cirkulace z jiné simulace LES od Proctora a Switzera a odpovídající výsledky P2P modelu pro různé scénáře turbulencí a stupně teplotního zvrstvení s parametrem ϵ [5]	21
Obrázek 6: Stupnice EDR pro lehké, středně těžké a těžké letouny [7]	23
Obrázek 7: Kumulativní distribuce času posledního měření lidar z 525 případů pro tři různé třídy turbulence charakterizované normalizovanou TKE (vlevo) a normalizovaným stupněm rozpadu víru ϵ^* (vpravo) [5]	25
Obrázek 8: Parametr rozpadu, $T^2 *$, jako funkce zvrstvení a turbulence odpovídající rovnici 17. [5]	26
Obrázek 9: Parametr rozpadu, $\nu^2 *$, jako funkce stratifikace pro různé úrovně turbulence dle LES dat (plné čáry znázorňují horní a dolní předpokládané hranice dle rovnic 18 a 19) [5]	27
Obrázek 10. Vztah mezi ideálním poloměrem jádra víru r_c a cirkulací $\Gamma^5 - 15 *$ pro rozpadající se vír [5]	29
Obrázek 11: Vztah mezi rychlostí klesání a $\Gamma^5 - 15 *$ pro různé rozstupy vírů, křivka s křížky z LES simulace obsahuje naměřené hodnoty pro $b_0=47m$ (Boeing 747) při $N^*=0$ [5]	30
Obrázek 12: Vztah naměřených hodnot normalizovaného rozstup úplavu $b^*=b/b_0$ ku normalizovanému času $t^*=t/t_0$ pro různé turbulentní případy "a", "b" ("n" značí neturbulentní stav) a pro BV frekvence $N^*=0, 0.35, 1, 1.4$. [11]	31
Obrázek 13: Jednotlivé fáze úplavu za letadlem a zobrazení rozstupu vírů [12]	31
Obrázek 14: Definice poloměru jádra víru a vnějšího víru pro dvojici protirotujících úplavových vírů po fázi rotace [12]	32
Obrázek 15: Srovnání sestupu mezi daty LES (symboly) a P2P (čáry) v klidném ovzduší s různými stupni rozvrstvení [5]	33
Obrázek 16: Grafické znázornění možného nebezpečí vlétnutí do turbulence v úplavu letadla [12]	34
Obrázek 17: Příklad možnosti aplikace SLOP	35
Obrázek 18: Zobrazení dodržení vertikálního rozstupu [17]	37

Obrázek 19: Zobrazení dodržení horizontálního rozstupu [17]	38
Obrázek 20: Schéma rozdělení letadel do nových kategorií podle RECAT-EU [2].....	41
Obrázek 21: Změna rozstupů podle RECAT-EU mezi letouny, které oba spadají do kategorie HEAVY podle ICAO [2].....	41
Obrázek 22: Překreslení tratě CL604 na základě dat z FDR do programu Google Earth [21]	47
Obrázek 23: Překreslení tratě A380 na základě dat z DAR do programu Google Earth [21]	47
Obrázek 24: Vnější stav letadla po nehodě [21].....	48
Obrázek 25: Vnitřní stav letadla po nehodě - poškození kabiny (pohled proti směru letu) [21] ...	49
Obrázek 26: Trajektorie letů A320 (červená) a A380 (zelená) 14.10.2011 v programu Google Earth [25].....	54
Obrázek 27: Trajektorie letů A320 (červená) a A380 (zelená) 16.10.2011 v programu Google Earth [26].....	55
Obrázek 28: Vlevo poloha letadel v době minutí, vpravo poloha letadel v době vlétnutí do turbulence [27].....	56
Obrázek 29: Zobrazení letových dat A319 v programu AirFASE (červeně trajektorie letu, oranžová barva znázorňuje vítr) [28]	57
Obrázek 30: Zobrazení ze serveru FlightRadar24.com trajektorie letu A380 a polohy A319 včetně zobrazení jeho Primary Flight Display [28].....	57
Obrázek 31: Analýza vlétnutí do úplavu 2013-2017 [29]	59
Obrázek 32: Zobrazení FIRů na světě s největším výskytem hlášení o vlétnutí do úplavu za letadlem [29]	60
Obrázek 33: Počet hlášení v jednotlivých fázích letu letadla vytvářející úplav [29].....	62
Obrázek 34: Zobrazení intenzity turbulence a počtu zranění při jednotlivých úhlech náklonu [29]	63
Obrázek 35: 3D zobrazení letů v době 15:20 UTC - 15:39 UTC 14/12/2017 do FL450 nad územím LKAA.....	66
Obrázek 36: 2D zobrazení trajektorie letounů A380 (oranžová, FL370) a B737 (modrá barva, FL360) v době 10:20 UTC - 10:39 UTC 31/12/2017 nad územím ČR.....	67
Obrázek 37: Comm-B odpověď na nadmořskou výšku	68
Obrázek 38: Určení normalizované cirkulace na konci fáze difúze pro $N^*=0$ (b) a při $\Gamma_0 = 854,3 \text{ m}^2/\text{s}$	75
Obrázek 39: Určení vertikální vzdálenosti vírů na konci fáze difúze pro $N^*=0$ a při $b_0=62,64\text{m}$...	77
Obrázek 40: Vztah normalizované rychlosti a normalizované cirkulace pro ideální rozstup vírů 25m (A380) pro $w_0=2,17 \text{ m/s}$, $\Gamma_0 = 854,3 \text{ m}^2/\text{s}$, $N^*=0$ (b).....	79

Obrázek 41: Ideální poloměr jádra víru $r_c=12,5\text{m}$ v hodnotě $\Gamma^5 - 15^* = 0,6$ a při $\Gamma^0 = 854,3 \text{ m}^2/\text{s}$	80
Obrázek 42: Skutečný rozstup vírů v závislosti na čase pro $N^*=0$ a při $b_0=62,64\text{m}$	81
Obrázek 43: Náčrt bezpečnostního prostoru z profilu v první fázi rozpadu při klidných meteorologických podmínkách letounu A380, příklad letových hladin FL350 a FL340 (obrázek není v měřítku).....	82
Obrázek 44: Náčrt bezpečnostního prostoru zezadu, celková šířka úplavu dosahuje přibližně 82m pro A380 v klidných meteorologických podmínkách.....	83
Obrázek 45: Rozdělení grafu pro normalizovanou sestupnou rychlost vírů na 3 části	84
Obrázek 46: Časový vývoj jader úplavových vírů při normalizované stratifikaci $N^*=0$ a 0,35, případ (b) [11]	88
Obrázek 47: Náčrt bezpečnostního prostoru z profilu po druhé fázi rozpadu při klidných meteorologických podmínkách letounu A380, příklad letových hladin FL350, FL340 a FL330 (obrázek není v měřítku).....	89
Obrázek 48: Určení normalizované cirkulace na konci fáze difúze pro $N^*=0,35$ (b) a při $\Gamma^0 = 854,3 \text{ m}^2/\text{s}$	90
Obrázek 49: Určení vertikální vzdálenosti vírů na konci fáze difúze pro $N^*=0,35$ a při $b_0=62,64\text{m}$	91
Obrázek 50: Skutečný rozstup vírů v závislosti na čase pro $N^*=0,35$ a při $b_0=62,64\text{m}$	92
Obrázek 51: Určení vertikální vzdálenosti vírů na konci fáze difúze pro $N^*=1,4$ a při $b_0=62,64\text{m}$	94
Obrázek 52: Určení normalizované cirkulace na konci fáze difúze pro $N^*=1,4$ (b) a při $\Gamma^0 = 854,3 \text{ m}^2/\text{s}$	95
Obrázek 53: Minimální horizontální rozstupy jednotlivých kategorií letadel A-F ve stejné letové hladině v bezvětří/při větru ve směru trati (obrázek není v měřítku)	96
Obrázek 54: Bezpečnostní prostor v nižší letové hladině (zde zachyceny letové hladiny 350 a 340) v bezvětří.....	97
Obrázek 55: Bezpečnostní prostor 3D v nižší letové hladině (zde zachyceny letové hladiny 350 a 340) s bočním větrem 50kt z obou stran	98
Obrázek 56: Bezpečnostní prostor 3D v nižší letové hladině (zde zachyceny letové hladiny 350 a 340) s bočním větrem 100kt z obou stran	98

9. Seznam tabulek

Tabulka 1: Parametry letadla a úplavu.....	13
Tabulka 2: Parametry a referenční čas pro letadla A340-300 a B747-400 s parametrem $s=\pi/4$ [1]	17
Tabulka 3: Rozdělení intenzity turbulence v závislosti na hodnotě EDR [8]	24
Tabulka 4: Minima radarových rozstupů podle turbulence v úplavu dle FAA [14]	39
Tabulka 5: Detaily letadla CL604 [21]	45
Tabulka 6: Detaily letadla A380 [21]	45
Tabulka 7: Meteorologické podmínky na letišti Muscat, Oman [21]	46
Tabulka 8: Detaily Flight Data Recorderu letadla CL604 [21]	46
Tabulka 9: GS a TAS letounů A319 a A380	58
Tabulka 10: Rozdělení letadel kategorie A a B podle turbulence v úplavu	61
Tabulka 11: Statistiky vzájemných zasažení úplavem letadel jednotlivých kategorií [29]	61
Tabulka 12: Vysvětlení zkratk k odpovědi DF 30 Comm-B	69
Tabulka 13: EHS BDS registry.....	70
Tabulka 14: Soubor dat poskytnutý z EHS BDS registrů [31].....	71
Tabulka 15: Základní parametry letounu A380-800.....	72
Tabulka 16: Hodnoty pro výpočet vertikálního sestupu úplavu ve druhé fázi.....	85
Tabulka 17: Prahy cirkulace pro jednotlivé kategorie letadel [8].....	87
Tabulka 18: Výpočet minimálních rozstupů za A380 pro jednotlivé kategorie letadel, při $\Gamma_0 = 854,3 \text{ m}^2/\text{s}$, $v=251 \text{ m/s}$ a $t_0=28,9\text{s}$	96

10. Seznam zdrojů

- [1] Frank Holzäpfel, Thomas Gerz, Denis Darracq [online]. 2002 [cit. 2018-01-13] *Commercial aircraft wake vortices*. Dostupné z WWW: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376042102000040>
- [2] David Příhoda [online]. 2017 [cit. 2018-01-18] *Bakalářská práce-Turbulence v úplavu*. Dostupné z WWW: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/73114>
- [3] Frank Holzäpfel [online]. 2005 [cit. 2018-02-25] *Aircraft Wake Vortex Evolution and Prediction*. Dostupné z WWW: <http://www.pa.op.dlr.de/wirbelschleppe/publ/habil.pdf>
- [4] Fred H. Proctor, George F. Switzer [online]. 2000 [cit. 2018-03-14] *Numerical simulation of aircraft trailing vortices*. Dostupné z WWW: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20000115874.pdf>
- [5] Frank Holzäpfel [online]. 2003 [cit. 2018-01-25] *Probabilistic Two-Phase Wake Vortex Decay and Transport Model*. Dostupné z WWW: <http://www.pa.op.dlr.de/wirbelschleppe/publ/JoA2003.pdf>
- [6] Jan Blechta [online]. 2010 [cit. 2018-04-12] *Projevy vlivu orografie ve stratifikovaném proudění*. Dostupné z WWW: https://dspace.cuni.cz/bitstream/handle/20.500.11956/37067/BPTX_2008_1_11320_0_232872_0_62951.pdf?sequence=1
- [7] Aviation Weather Center [online]. 2018 [cit. 2018-05-10] *Turbulence Help-GTG Graphics*. Dostupné z WWW: <https://aviationweather.gov/turbulence/help?page=plot>
- [8] Zheng Fan [online]. 2014 [cit. 2018-06-15] *A Computer Model to Predict Potential Wake Turbulence Encounters in the National Airspace System*. Dostupné z WWW: https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/75043/Fan_Z_D_2015.pdf?sequence=1
- [9] Konzultace s: Dr. Ing. Judith Rosenow, odborník na leteckou meteorologii [2018-10-30]
- [10] Konzultace s: Dr. Ing.habil. Frank Holzäpfel, odborník na leteckou meteorologii a atmosférickou fyziku [2018-11-08]

- [11] Frank Holzäpfel, Thomas gerz, Robert Baumann [online]. 2000 [cit. 2018-04-15] *The turbulent decay of trailing vortex pairs in stably stratified environments*. Dostupné z WWW: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1270963800010907>>
- [12] C. Breitsamter [online]. 2010 [cit. 2018-05-25] *Wake vortex characteristics of transport aircraft*. Dostupné z WWW: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376042110000576>>
- [13] Judith Rosenow [online]. 2016 [cit. 2018-10-25] *Optical Properties of Condensation Trails*. Dostupné z WWW: <https://www.researchgate.net/publication/309464261_Optical_Properties_of_Condensation_Trails>
- [14] Konzultace s: Martin Sládek, řídící letového provozu České republiky [2018-03-13]
- [15] IVAO [online]. 2015 [cit. 2018-09-25] *Strategic Lateral Offset Procedure-SLOP*. Dostupné z WWW: <https://www.iviao.aero/training/documentation/books/ATP_SEC_SLOP.pdf>
- [16] SKY brary [online]. 2018 [cit. 2018-09-10] *Wake Vortex Turbulence*. Dostupné z WWW: <https://www.skybrary.aero/index.php/Wake_Vortex_Turbulence>
- [17] IVAO [online]. 2016 [cit. 2018-04-01] *IFR Separation Using Radar*. Dostupné z WWW: <https://www.iviao.aero/training/documentation/books/SPP_APC_Radar_separation.pdf>
- [18] SKY brary [online]. 2016 [cit. 2018-09-11] *Separation Standards*. Dostupné z WWW: <https://www.skybrary.aero/index.php/Separation_Standards>
- [19] Řízení letového provozu, Letecká informační služba [online]. 2018 [cit. 2018-01-01] *Letecký předpis L4444*. Dostupné z WWW: <<https://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-4444/index.htm>>.
- [20] FAA [online]. 2015 [cit. 2018-07-11] *Air Traffic Organization Policy*. Dostupné z WWW: <<https://www.faa.gov/documentlibrary/media/order/atc.pdf>>
- [21] Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung [online]. 2017 [cit. 2018-05-01] *Interim Report-ref.number: BFU17-0024-2X*. Dostupné z WWW: <https://www.bfu-web.de/EN/Publications/Interim_Reports/reports_node.html>
- [22] Konzultace s: Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung [2018-03-21]

- [23] The Aviation Herald [online]. 2009 [cit. 2018-02-02] *Incident: Armavia A320 near Tbilisi on Jan 11th 2009, turbulence at cruise level thought to be A380 wake*. Dostupné z WWW: <<http://avherald.com/h?article=4133e3a4&opt=0>>
- [24] The Aviation Herald [online]. 2011 [cit. 2018-02-02] *Report: Antonov A124, Singapore A388 and Air France B744 near Frankfurt on Feb 10th 2011, wake turbulence by A388 causes TCAS RA*. Dostupné z WWW: <<http://avherald.com/h?article=43a94ab0&opt=0>>
- [25] The Aviation Herald [online]. 2011 [cit. 2018-02-03] *Incident: Air France A320 and Emirates A388 near Frankfurt on Oct 14th 2011, wake turbulence*. Dostupné z WWW: <<http://avherald.com/h?article=44822e37&opt=0>>
- [26] The Aviation Herald [online]. 2011 [cit. 2018-02-05] *Accident: British Airways A320 and Qantas A388 near Braunschweig on Oct 16th 2011, wake turbulence injures 4*. Dostupné z WWW: <<http://avherald.com/h?article=448220f1&opt=0>>
- [27] Australian Transport Safety Bureau [online]. 2012 [cit. 2018-03-25] *Wake turbulence event involving a Boeing 737, VH-YIO*. Dostupné z WWW: <https://www.atsb.gov.au/media/4117680/ao-2012-121_final.pdf>
- [28] Konzultace s: Ing. Ivo Bartoň, vedoucí oddělení ČSA flight safety [2018-03-10]
- [29] IATA [online]. 2018 [cit. 2018-11-10] *Analysis of Wake Turbulence Encounters in Cruise*. Zdroj IATA utajen. Dostupné od ČSA flight safety v rámci partnerského programu. Dostupné z WWW: <<https://www.iata.org/services/statistics/gadm/steades/Pages/index.aspx>>
- [30] SKY brary [online]. 2017 [cit. 2018-08-01] *RECAT-Wake Turbulence Re-categorisation*. Dostupné z WWW: <https://www.skybrary.aero/index.php/RECAT_-_Wake_Turbulence_Re-categorisation>
- [31] Tereza Topková [online]. 2017 [cit. 2018-09-18] *Diplomová práce-Identification of BDS registers*. Dostupné z WWW: <<https://dspace.cvut.cz/handle/10467/74081>>
- [32] Frank Holzäpfel, Jan Kladetzke [online]. 2010 [cit. 2018-11-10] *Assessment of Wake-Vortex Encounter Probabilities for Crosswind Departure Scenarios*. Dostupné z WWW: <<https://pdfs.semanticscholar.org/b593/fc09dd73881020fed3603925727e41acc59.pdf>>

11. Seznam příloh

Příloha A – Wake Vortex Report


Příloha B – Seznam letů pozorování mezi 10.12.2017 a 10.1.2018 nad Českou republikou

Příloha C – Skripta programu MATLAB

12. Přílohy

PŘÍLOHA A

Date	30. 5. 2017
Company	*Czech Airlines
Flight No.	OK 712
DEP	PRG
ARR	OPO
A/C Reg.	OK-NEP
Time	1452
Phase of Day	Day
Aircraft weight (kg)	58000
Geographical Location	LATITUDE N49.9201 LONGITUDE E10.1241
Air Route	off-route - avoiding WX
Flight Level	FL380
Speed/Mach number	M0.76
Flight Phase	Cruise
Were you turning?	No
Did you request a flight level change?	No
Did you request a change of heading?	No
Did you inform ATC?	Yes
MET Conditions	VMC
Actual Wind	200°/40kt
Actual Visibility	10+km
Actual Cloud	CB on the right of our track
Actual Temperature	-60°C
Degree of Turbulence	Severe
Other Significant Weather?	CB on the right of our track
What made you suspect Wake Vortex as the cause of the disturbance?	informed by ATC that A380 crossed our track in opposite direction 1000ft above 2mins before
Did you experience vertical acceleration/velocity?	Yes
If Yes please describe briefly.	Sudden hard kick when crossing vortex followed by smooth flight again
Change of Pitch	less than 10°
Change of Roll	less than 20°
Change of Yaw	less than 10°
What was the change in height if any?	no change
Was there buffeting?	No
Was there stick shake?	No

Was the autopilot engaged?	Yes
Was the autothrottle engaged?	Yes
What control action was taken?	A/P remained connected
Could you see the aircraft suspected of causing the wake vortex?	No
Did you contact the aircraft suspected of causing the whole vortex?	No
What type of aircraft was it?	A380 Qatar Airways - callsign QTR36U (source flightradar24.com)
And where was it relative to your position?	crossed our track in opposite direction 1000ft above 2mins before
Were you aware of the preceding aircraft before the incident?	No
Do you have any other comments which you think may be useful?	Improve ATC separation procedure concerning A380. I see it as a great threat to aviation safety.
Commander's Name	
Remarks	

PŘÍLOHA B

10.12.2017			
ČAS (UTC)	LETOVÁ HLADINA A380	ČÍSLO LETU A380	ČÍSLO LETU OHROŽENÉHO LETOUNU
16:09	370	UAE23E	EZS39CX
22:30	390	UAE76F	RYR6HP
22:33	390	UAE76F	EZY89CH

11.12.2017			
ČAS (UTC)	LETOVÁ HLADINA A380	ČÍSLO LETU A380	ČÍSLO LETU OHROŽENÉHO LETOUNU
15:33	390	UAE152	RYR2806

12.12.2017			
ČAS (UTC)	LETOVÁ HLADINA A380	ČÍSLO LETU A380	ČÍSLO LETU OHROŽENÉHO LETOUNU
10:38	390	QTR13VP	PGT7LU
10:39	390	QTR13VP	DLH8V
11:05	370	UAE43C	RYR1XU
11:25	370	UAE8	PGT8MD
11:45	370	UAE12	MSR757
12:01	370	UAE22	WZZ664

13.12.2017			
ČAS (UTC)	LETOVÁ HLADINA A380	ČÍSLO LETU A380	ČÍSLO LETU OHROŽENÉHO LETOUNU
14:56	390	UAE31V	EZY4784
15:50	400	ETD57Y	SXS9PY
17:05	380	UAE9WL	EZY83BL
20:48	370	UAE58	BAW663

14.12.2017			
ČAS (UTC)	LETOVÁ HLADINA A380	ČÍSLO LETU A380	ČÍSLO LETU OHROŽENÉHO LETOUNU
5:00	380	UAE21	BCS960
9:20	380	UAE17	LZB320
15:10	370	UAE56	RYR3WZ
15:20	370	UAE56	THY5NH
17:32	400	UAE149	RYR5207

15.12.2017			
ČAS (UTC)	LETOVÁ HLADINA A380	ČÍSLO LETU A380	ČÍSLO LETU OHROŽENÉHO LETOUNU
11:10	400	QTR71AM	BEL2RK
14:31	370	QFA10	KLM8142
17:18	400	UAE9WL	LOT434
21:20	390	UAE58	RYR17ZL

16.12.2017			
ČAS (UTC)	LETOVÁ HLADINA A380	ČÍSLO LETU A380	ČÍSLO LETU OHROŽENÉHO LETOUNU
10:24	380	UAE147	CAI1A
10:40	380	UAE3PW	RYR15TK
17:30	400	UAE149	RYR1911

17.12.2017			
ČAS (UTC)	LETOVÁ HLADINA A380	ČÍSLO LETU A380	ČÍSLO LETU OHROŽENÉHO LETOUNU
17:29	380	UAE57	RYR8HZ
18:08	380	UAE4CK	RYR30DX

18.12.2017			
ČAS (UTC)	LETOVÁ HLADINA A380	ČÍSLO LETU A380	ČÍSLO LETU OHROŽENÉHO LETOUNU
10:16	400	QTR71AM	RYR4024
12:27	390	UAE43C	WZZ2PH

19.12.2017			
ČAS (UTC)	LETOVÁ HLADINA A380	ČÍSLO LETU A380	ČÍSLO LETU OHROŽENÉHO LETOUNU
16:20	370	ETD20	AZA785
16:22	400	QFA9	ETD914
22:25	370	QFA2	IBK5423

20.12.2017			
ČAS (UTC)	LETOVÁ HLADINA A380	ČÍSLO LETU A380	ČÍSLO LETU OHROŽENÉHO LETOUNU
12:09	350	MAS3	EZY75LM

21.12.2017			
ČAS (UTC)	LETOVÁ HLADINA A380	ČÍSLO LETU A380	ČÍSLO LETU OHROŽENÉHO LETOUNU
10:40	390	QTR13VP	NAX76Z
11:19	390	UAE12	RYR9UD
14:12	350	THA911	MSR757

22.12.2017			
ČAS (UTC)	LETOVÁ HLADINA A380	ČÍSLO LETU A380	ČÍSLO LETU OHROŽENÉHO LETOUNU
11:18	390	UAE8	EZY4604
13:10	380	ETD11B	EZY93QK

23.12.2017			
ČAS (UTC)	LETOVÁ HLADINA A380	ČÍSLO LETU A380	ČÍSLO LETU OHROŽENÉHO LETOUNU
10:26	380	UAE73	RYR4VL
21:04	370	UAE58	TRA6870
21:55	350	DLH772	ELY211

24.12.2017			
ČAS (UTC)	LETOVÁ HLADINA A380	ČÍSLO LETU A380	ČÍSLO LETU OHROŽENÉHO LETOUNU
16:21	390	ETD20	SXS5FC

25.12.2017			
ČAS (UTC)	LETOVÁ HLADINA A380	ČÍSLO LETU A380	ČÍSLO LETU OHROŽENÉHO LETOUNU
17:25	380	UAE149	THY5XA

26.12.2017			
ČAS (UTC)	LETOVÁ HLADINA A380	ČÍSLO LETU A380	ČÍSLO LETU OHROŽENÉHO LETOUNU
4:48	370	UAE208	SBI691
13:39	370	QFA10	RYR9099
15:55	370	UAE47L	LBK6LE

27.12.2017			
ČAS (UTC)	LETOVÁ HLADINA A380	ČÍSLO LETU A380	ČÍSLO LETU OHROŽENÉHO LETOUNU
16:47	380	UAE3PG	PGT79W

28.12.2017			
ČAS (UTC)	LETOVÁ HLADINA A380	ČÍSLO LETU A380	ČÍSLO LETU OHROŽENÉHO LETOUNU
12:18	370	MAS3	BAW869
13:44	370	QFA10	NAX2ZY
15:55	380	ETD57Y	RYR4WB

29.12.2017			
ČAS (UTC)	LETOVÁ HLADINA A380	ČÍSLO LETU A380	ČÍSLO LETU OHROŽENÉHO LETOUNU
-	-	-	-

30.12.2017			
ČAS (UTC)	LETOVÁ HLADINA A380	ČÍSLO LETU A380	ČÍSLO LETU OHROŽENÉHO LETOUNU
11:39	350	SIA25	AFL2612
11:50	400	UAE29	DLH7XH
22:18	370	UAE4	SXS2WY

31.12.2017			
ČAS (UTC)	LETOVÁ HLADINA A380	ČÍSLO LETU A380	ČÍSLO LETU OHROŽENÉHO LETOUNU
10:25	370	UAE37V	RYR83AZ
12:01	390	UAE43C	MSR757

01.01.2018			
ČAS (UTC)	LETOVÁ HLADINA A380	ČÍSLO LETU A380	ČÍSLO LETU OHROŽENÉHO LETOUNU
11:37	380	UAE29	GMI5584
11:40	380	UAE29	THY7NU
15:51	390	UAE47L	RYR3EN
21:30	370	UAE58	VLG8845

02.01.2018			
ČAS (UTC)	LETOVÁ HLADINA A380	ČÍSLO LETU A380	ČÍSLO LETU OHROŽENÉHO LETOUNU
13:48	370	QFA10	BAW891
16:48	400	UAE9EX	E35L
20:55	370	UAE58	EZY43UC

03.01.2018			
ČAS (UTC)	LETOVÁ HLADINA A380	ČÍSLO LETU A380	ČÍSLO LETU OHROŽENÉHO LETOUNU
10:00	400	UAE6VH	SAS49L
13:47	370	QFA10	DLH7MA
21:45	370	UAE4	RYR6HP

04.01.2018			
ČAS (UTC)	LETOVÁ HLADINA A380	ČÍSLO LETU A380	ČÍSLO LETU OHROŽENÉHO LETOUNU
10:31	400	QTR2NX	OMA116
22:52	350	UAE20	MNB223

05.01.2018			
ČAS (UTC)	LETOVÁ HLADINA A380	ČÍSLO LETU A380	ČÍSLO LETU OHROŽENÉHO LETOUNU
15:16	370	UAE47L	WZZ9XF

06.01.2018			
ČAS (UTC)	LETOVÁ HLADINA A380	ČÍSLO LETU A380	ČÍSLO LETU OHROŽENÉHO LETOUNU
10:52	390	QTR13VP	RYR16XV
15:00	350	UAE23E	THY3XY
17:55	400	UAE149	CAI3EG
18:08	390	UAE79Y	SWR1327

07.01.2018			
ČAS (UTC)	LETOVÁ HLADINA A380	ČÍSLO LETU A380	ČÍSLO LETU OHROŽENÉHO LETOUNU
10:03	370	UAE44	PGT9G
10:38	390	QTR13VP	IBK1021
10:48	390	QTR13VP	RYR16XV
20:49	390	UAE32	TRA6862

08.01.2018			
ČAS (UTC)	LETOVÁ HLADINA A380	ČÍSLO LETU A380	ČÍSLO LETU OHROŽENÉHO LETOUNU
10:32	400	QTR2NX	KLM67R
13:26	340	ETD11B	THY4VQ
17:07	400	UAE57	EZY8513
21:19	350	BAW11	WZZ234
22:03	390	UAE4	UPS275
22:18	370	QFA2	EZY2086

09.01.2018			
ČAS (UTC)	LETOVÁ HLADINA A380	ČÍSLO LETU A380	ČÍSLO LETU OHROŽENÉHO LETOUNU
4:45	400	ETD89G	BCS960
12:34	380	UAE29	AFR1752

10.01.2018			
ČAS (UTC)	LETOVÁ HLADINA A380	ČÍSLO LETU A380	ČÍSLO LETU OHROŽENÉHO LETOUNU
14:35	380	UAE31	IBE3144
20:49	390	UAE32	WZZ8068
20:51	390	UAE32	TRA5802

PŘÍLOHA C

DF17_Filter2.m

```
clc
clear all

% Skript načítající data uložená na lokálním disku ve složce
"Archiv".
% -> bohužel jen poslední vždy načte!!!!!!!
% Načítá data ve formátu .dat, která jsou ke stažení z FTP
serveru.

%% Initialize variables.
s = dir ('./Archiv/*.dat');%adresář "Archiv" musí být přítomen ve
složce ze kterého je program spouštěn nebo použit celou cestu
pocet_files=size(s,1);%zjistí počet souborů v daném adresáři

for i=1:pocet_files
    nazev = s(i).name;
    nazev=nazev(1,1:(end-4));
    filename = ['./Archiv/',nazev, '.dat'];

    delimiter = ';';
    %% Format string for each line of text:
    %   column1: double (%f)
    %   column2: double (%f)
    %   column3: text (%s)
    %   column4: text (%s)
    formatSpec = '%f%f%s%s%[\n\r]';

    %% Open the text file.
    fileID = fopen(filename,'r');
    dataArray = textscan(fileID, formatSpec, 'Delimiter',
delimiter, 'EmptyValue', NaN, 'ReturnOnError', false);
    fclose(fileID);

    %% Allocate imported array to column variable names
    Unix_time = dataArray(:, 1);
    prijimac = dataArray(:, 2);
    time = dataArray(:, 3);
    Message = dataArray(:, 4);

    %% Clear temporary variables
```

```

clearvars filename delimiter formatSpec fileID dataArray
ans;
%%

%program ponechá z původního datového balíčku pouze
extended
%squitter zprávy (8D...), přeloží je do binárního formátu
uloží je
%do matice MsgBin.mat, kterou je možné v
%dalších skriptech načíst

Message=char(Message);
[R,~]=size(Message);

tic %start stopek
info=zeros(R,1);
for k=1:R
    if Message(k,1)=='8' && Message(k,2)=='D'
        info(k,1)=1;
    else info(k,1)=0;
    end
end
Message(sum(info,2)~=1,:)=[];
Message=cellstr(Message);
Unix_time(sum(info,2)~=1,:)=[];

[r,~]=size(Message);
for j=1:r
    [MsgBin(j,:)] = Binary_Message(Message(j,1));
    j
end
toc %stop stopek
save('MsgBin.mat','MsgBin'); %ukládá do stejné složky, ve
které je tento skript
save('Unix_time.mat','Unix_time');

end

```

Binary_Message.m

```
function [MsgBin] = Binary_Message(Message)
%UNTITLED2 Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here

    MsgB=hexToBinaryVector(Message(1,:));
    L=length(MsgB);
    if L<112
        l=112-L;
        MsgBin=[MsgB zeros(1,(l))];

    elseif L>112
        MsgBin=MsgB(1,1:112);

    else
        MsgBin=MsgB;

end
```

CRCchecksum.m

```
clc
clear all
load('MsgBin.mat')

[R,~]=size(MsgBin);

for i=1:R
    [CRC(i,.)]=crc_division4(MsgBin(i,:));
end

save('CRCchecksum.mat','CRC');
```

crc_division4.m

```
function [Adress, Adress_hex]=crc_division4(dataBIN)
% dataBIN - celá správa v binárním formátu
% input=hex2bin([data]);
genpol=[1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 0 0 0 0 0 1 0 0 1];
[~,r]=deconv(dataBIN,genpol);
%quotient=mod(q,2);% Modulus after division, M = mod(X,Y) returns
X - n.*Y
remainder=mod(r,2);
Adress=remainder(1, (end-23):end);
Adress_hex=bin2hex(Adress);% převedení do hex
end
```

bin2hex.m

```
function hex=bin2hex(bin)
%bin = vektor double
n=length(bin)./4;
hex=blanks(n);
for i=1:n
    bin_i=bin((i*4)-3:i*4);
    if bin_i==[1 1 1 1]
        hex(1,i)='F';
    elseif bin_i==[1 1 1 0]
        hex(1,i)='E';
    elseif bin_i==[1 1 0 1]
        hex(1,i)='D';
    elseif bin_i==[1 1 0 0]
        hex(1,i)='C';
    elseif bin_i==[1 0 1 1]
        hex(1,i)='B';
    elseif bin_i==[1 0 1 0]
        hex(1,i)='A';
    elseif bin_i==[1 0 0 1]
        hex(1,i)='9';
    elseif bin_i==[1 0 0 0]
        hex(1,i)='8';
    elseif bin_i==[0 1 1 1]
        hex(1,i)='7';
    elseif bin_i==[0 1 1 0]
        hex(1,i)='6';
    elseif bin_i==[0 1 0 1]
        hex(1,i)='5';
    elseif bin_i==[0 1 0 0]
        hex(1,i)='4';
    elseif bin_i==[0 0 1 1]
```



```

        hex(1,i)='3';
elseif bin_i==[0 0 1 0]
        hex(1,i)='2';
elseif bin_i==[0 0 0 1]
        hex(1,i)='1';
elseif bin_i==[0 0 0 0]
        hex(1,i)='0';
end
end
end

```

CRC_odstraneni_chybnych_zprav.m

```

clc
clear all

load('CRCChecksum.mat')
load('MsgBin.mat')
load('Unix_time.mat')

MsgBin(sum(CRC,2)~=0,:)=[];
Unix_time(sum(CRC,2)~=0,:)=[];

save('MsgBin.mat','MsgBin');

save('Unix_time.mat','Unix_time');

```

Vypocet_polohy.m

```

clear all
clc

%% Poloha --- počítá polohu z matice extended squitteru ze
souboru MsgBin.mat
tic
load('MsgBin.mat'); %načítá matici se zprávami v binárním
formátu

DF_TC_9=MsgBin;
[Rap9,~]=size(DF_TC_9);
infoap9=((DF_TC_9(:,33:37))==repmat([0 1 0 0 1],Rap9,1));
DF_TC_9(sum(infoap9,2)~=5,:)=[];

```

```

DF_TC_10=MsgBin;
[Rap10,~]=size(DF_TC_10);
infoap10=((DF_TC_10(:,33:37))==repmat([0 1 0 1
0],Rap10,1));
DF_TC_10(sum(infoap10,2)~=5,:)=[];

DF_TC_11=MsgBin;
[Rap11,~]=size(DF_TC_11);
infoap11=((DF_TC_11(:,33:37))==repmat([0 1 0 1
1],Rap11,1));
DF_TC_11(sum(infoap11,2)~=5,:)=[];

DF_TC_12=MsgBin;
[Rap12,~]=size(DF_TC_12);
infoap12=((DF_TC_12(:,33:37))==repmat([0 1 1 0
0],Rap12,1));
DF_TC_12(sum(infoap12,2)~=5,:)=[];

DF_TC_13=MsgBin;
[Rap13,~]=size(DF_TC_13);
infoap13=((DF_TC_13(:,33:37))==repmat([0 1 1 0
1],Rap13,1));
DF_TC_13(sum(infoap13,2)~=5,:)=[];

DF_TC_14=MsgBin;
[Rap14,~]=size(DF_TC_14);
infoap14=((DF_TC_14(:,33:37))==repmat([0 1 1 1
0],Rap14,1));
DF_TC_14(sum(infoap14,2)~=5,:)=[];

DF_TC_15=MsgBin;
[Rap15,~]=size(DF_TC_15);
infoap15=((DF_TC_15(:,33:37))==repmat([0 1 1 1
1],Rap15,1));
DF_TC_15(sum(infoap15,2)~=5,:)=[];

DF_TC_16=MsgBin;
[Rap16,~]=size(DF_TC_16);
infoap16=((DF_TC_16(:,33:37))==repmat([1 0 0 0
0],Rap16,1));
DF_TC_16(sum(infoap16,2)~=5,:)=[];

DF_TC_17=MsgBin;
[Rap17,~]=size(DF_TC_17);
infoap17=((DF_TC_17(:,33:37))==repmat([1 0 0 0
1],Rap17,1));
DF_TC_17(sum(infoap17,2)~=5,:)=[];

```

```

DF_TC_18=MsgBin;
[Rap18,~]=size(DF_TC_18);
infoap18=((DF_TC_18(:,33:37))==repmat([1 0 0 1
0],Rap18,1));
DF_TC_18(sum(infoap18,2)~=5,:)=[];

DF_bin=[DF_TC_9; DF_TC_10; DF_TC_11; DF_TC_12; DF_TC_13;
DF_TC_14; DF_TC_15; DF_TC_16; DF_TC_17; DF_TC_18];
%POZOR! Matice DF_bin obsahuje pouze zprávy týkající se
polohy, ale
%nejso zatím seřazeny chronologicky!!!

%% Vypocet zemepisnych souradnic
[R11,~]=size(DF_bin);

latS=50; %referenční šířka a délka
lonS=14;

for I=1:R11

[Lat(I,1),Lon(I,1)]=DF17_poloha(DF_bin(I,:),latS,lonS);

end

%% Výpočet výšky
for I=1:R11
[Altitude(I,1)] = DF17_TC9_18_vyska(DF_bin(I,:));
end

[R,~]=size(DF_bin);

for i=1:R
[Adress(i,)] = AC_Adress(DF_bin(i,:));
i
end

POSITION=[Adress, Altitude, Lat, Lon];
save('Position.mat','POSITION');
save('Lat.mat','Lat');
save('Lon.mat','Lon');
save('Altitude.mat','Altitude');
toc

```

DF17_poloha.m

```
function [Lat, Lon]=DF17_poloha (DF, latS, lonS)
%DF=binární 112 bitová zpráva
%latS= Referencni zemepisna sirka
%lonS= Referencni zemepisna delka

CPR_format=DF(54); % Formát CPR odd/even
CPR_lat=DF(55:71);
CPR_lon=DF(72:88);

YZ=polyval(CPR_lat,2); % převede binární číslo na decimální
XZ=polyval(CPR_lon,2);

NZ=15; % Pocet sektoru
Nb=length(CPR_lat);
%-----Zemepisna sirka-----
-----
Dlat=360/(4*NZ-CPR_format);

j1=latS/Dlat;
j2=0.5+(mod(latS,Dlat))/Dlat-YZ/(2^Nb);
j=floor(j1)+floor(j2);

Lat=Dlat*(j+YZ/(2^Nb));

%-----Zemepisna delka-----
-----
NL_Rlat1=1-(1-cos(pi/(2*NZ)))/((cos((pi/180)*abs(Lat)))^2);
NL_Rlat2=acos(NL_Rlat1);
NL_Rlat3=NL_Rlat2^(-1);
NL_Rlat4=NL_Rlat3*2*pi;
NL_Rlat=floor(NL_Rlat4);

NL_Rlat_Dlon=NL_Rlat-CPR_format;

if NL_Rlat_Dlon==0
    Dlon=360;
else
    Dlon=360/NL_Rlat_Dlon;
end
m1=lonS/Dlon;
m2=0.5+(mod(lonS,Dlon))/Dlon-XZ/(2^Nb);
m=floor(m1)+floor(m2);
```

```
Lon=Dlon*(m+XZ/(2^Nb));  
end
```

DF17_TC9_18_vyska.m

```
function [Altitude] = DF17_TC9_18_vyska(DF_bin)  
AC=DF_bin(1,41:52);  
QQ=AC(8);  
if QQ==0  
%   ALT=zeros(1,11);  
%   ALT(1:7)=AC(1:7);  
%   ALT(8:11)=AC(9:12);  
ALT=[AC(1:7) AC(9:12)];  
Altitude=polyval(ALT, 2); %x100ft = v nasobcich 100ft  
Altitude=Altitude.*100;  
  
elseif QQ==1  
%   ALT=zeros(1,11);  
%   ALT(1:7)=AC(1:7);  
%   ALT(8:11)=AC(9:12);  
ALT=[AC(1:7) AC(9:12)];  
Altitude=polyval(ALT, 2); %x25ft = v nasobcich 25ft  
Altitude=(Altitude.*25)-1000;  
end  
end
```

AC_Adress.m

```
function [ Adress ] = AC_Adress( Source )  
%UNTITLED3 Summary of this function goes here  
% Detailed explanation goes here  
  
Adress=Source(1,9:32);  
Adress=binaryVectorToHex(Adress);  
  
Adress=strcat(Adress);  
  
end
```

Vyber_Polohu.m

```
%% Skript vybere polohové zprávy pouze v zadané oblasti
%Oblast je tvořena obdélníkem
%Pro výpočet uživatel zadá nejvýhodnější, nejzápadnější,
nejsevernější a
%nejjižnější omezující souřadnice

clc
clear all

tic %start stopsek
load('Position.mat')
load('Altitude.mat')
load('Lon.mat')
load('Lat.mat')
load('hraniceCR.mat')

%% Definování obdélníkové oblasti
n = input('Zadejte 1 pro LKPR, zadejte 2 pro LKAA: ');

switch n
    case 1
        North=50.5;      %50.5 -- PRG
        West=13.4;       %13.4
        South=49.8;     %49.8
        East=15;        %15

    case 2
        North=max(hraniceCR(:,1));
        West=min(hraniceCR(:,2));
        South=min(hraniceCR(:,1));
        East=max(hraniceCR(:,2));
end

FL=input('Zadejte maximální letovou hladinu: ');
FL=FL*100;

%%
P=[Lat Lon Altitude];
[R,~]=size(P);

infoA=zeros(R,1);
for k=1:R
    if P(k,3)<FL
        infoA(k,1)=1;
    else infoA(k,1)=0;
    end
end
end
```

```

P(sum(infoA,2)~=1,:)=[];
POSITION(sum(infoA,2)~=1,:)=[];

[R,~]=size(P);

infoN=zeros(R,1);
for k=1:R
    if P(k,1)>=South && P(k,1)<=North
        infoN(k,1)=1;
    else infoN(k,1)=0;
    end
end
P(sum(infoN,2)~=1,:)=[];
POSITION(sum(infoN,2)~=1,:)=[];

[R,~]=size(P);
infoE=zeros(R,1);
for k=1:R
    if P(k,2)>=West && P(k,2)<=East
        infoE(k,1)=1;
    else infoE(k,1)=0;
    end
end
P(sum(infoE,2)~=1,:)=[];
POSITION(sum(infoE,2)~=1,:)=[];

figure(1) %2D obrázek
plot(P(:,2),P(:,1),'.');
%title('LKPR'); %manuálně nastavit titulek obrázku
hold on
plot(hraniceCR(:,2),hraniceCR(:,1));

figure(2)
plot3(P(:,2),P(:,1),P(:,3),'.');
%title('LKPR'); %manuálně nastavit titulek obrázku
hold on
plot3(hraniceCR(:,2),hraniceCR(:,1),hraniceCR(:,3));

N=unique(POSITION(:,1));
[nr,~]=size(N);%počet letadel, zatím je ten údaj blbost

toc %stop stopek

```

hraniceCR – soubor dat ke stažení v příloze

VyhledaniPodleAdresy.m

```
% Skript vyhledává v matici s extended squitter zprávami pouze
zprávy
% týkající se konkrétního letadla, na základě uživatelem zadané
ICAO
% adresy letadla
% Zatím skript zjistí: trajektorii letadla v prostoru, callsign
%%
clear all
clc

load('hraniceCR.mat')
load('MsgBin.mat');
load('Unix_time.mat');
Adress=input('Zadej ICAO adresu letadla: ','s'); %po spuštění
skriptu je potřeba zadat do příkazového řádku ICAO adresu
letadla, které nás zajímá
AdressBin=hexToBinaryVector(Adress);

l=length(AdressBin);

if l==23
    AdressBin=[0 AdressBin];

elseif l==22
    AdressBin=[0 0 AdressBin];

elseif l==21
    AdressBin=[0 0 0 AdressBin];
end

MsgBinAdress=MsgBin;
[R,~]=size(MsgBinAdress);
info=(MsgBinAdress(:,9:32))==repmat([AdressBin],R,1);
MsgBinAdress(sum(info,2)~=24,:)=[];
Unix_time(sum(info,2)~=24,:)=[]; %2 místo 1

%% Poloha letadla
DF_TC_9=MsgBinAdress;
[Rap9,~]=size(DF_TC_9);
infoap9=((DF_TC_9(:,33:37))==repmat([0 1 0 0 1],Rap9,1));

DF_TC_10=MsgBinAdress;
DF_TC_9(sum(infoap9,2)~=5,:)=[];
[Rap10,~]=size(DF_TC_10);
infoap10=((DF_TC_10(:,33:37))==repmat([0 1 0 1
0],Rap10,1));
DF_TC_10(sum(infoap10,2)~=5,:)=[];
```



```

DF_TC_11=MsgBinAdress;
[Rap11,~]=size(DF_TC_11);
infoap11=((DF_TC_11(:,33:37))==repmat([0 1 0 1
1],Rap11,1));
DF_TC_11(sum(infoap11,2)~=5,:)=[];

DF_TC_12=MsgBinAdress;
[Rap12,~]=size(DF_TC_12);
infoap12=((DF_TC_12(:,33:37))==repmat([0 1 1 0
0],Rap12,1));
DF_TC_12(sum(infoap12,2)~=5,:)=[];

DF_TC_13=MsgBinAdress;
[Rap13,~]=size(DF_TC_13);
infoap13=((DF_TC_13(:,33:37))==repmat([0 1 1 0
1],Rap13,1));
DF_TC_13(sum(infoap13,2)~=5,:)=[];

DF_TC_14=MsgBinAdress;
[Rap14,~]=size(DF_TC_14);
infoap14=((DF_TC_14(:,33:37))==repmat([0 1 1 1
0],Rap14,1));
DF_TC_14(sum(infoap14,2)~=5,:)=[];

DF_TC_15=MsgBinAdress;
[Rap15,~]=size(DF_TC_15);
infoap15=((DF_TC_15(:,33:37))==repmat([0 1 1 1
1],Rap15,1));
DF_TC_15(sum(infoap15,2)~=5,:)=[];

DF_TC_16=MsgBinAdress;
[Rap16,~]=size(DF_TC_16);
infoap16=((DF_TC_16(:,33:37))==repmat([1 0 0 0
0],Rap16,1));
DF_TC_16(sum(infoap16,2)~=5,:)=[];

DF_TC_17=MsgBinAdress;
[Rap17,~]=size(DF_TC_17);
infoap17=((DF_TC_17(:,33:37))==repmat([1 0 0 0
1],Rap17,1));
DF_TC_17(sum(infoap17,2)~=5,:)=[];

DF_TC_18=MsgBinAdress;
[Rap18,~]=size(DF_TC_18);
infoap18=((DF_TC_18(:,33:37))==repmat([1 0 0 1
0],Rap18,1));
DF_TC_18(sum(infoap18,2)~=5,:)=[];

```

```

    DF_bin=[DF_TC_9; DF_TC_10; DF_TC_11; DF_TC_12; DF_TC_13;
DF_TC_14; DF_TC_15; DF_TC_16; DF_TC_17; DF_TC_18];

    % Vypocet zemepisnych souradnic
    [R11,~]=size(DF_bin);

    latS=50;
    lonS=14;

    for I=1:R11

        [Lat(I,1),Lon(I,1)]=DF17_poloha(DF_bin(I,:),latS,lonS);

    end

    % Výpočet výšky
    for I=1:R11
        [Altitude(I,1)] = DF17_TC9_18_vyska(DF_bin(I,:));
    end

    POSITION_Adress=[Altitude, Lat, Lon];

    figure(1)
    plot( POSITION_Adress(:,3), POSITION_Adress(:,2),'.');
    title(Adress);
    hold on;
    plot(hraniceCR(:,2),hraniceCR(:,1));

    %% ac identification
    ident=MsgBinAdress;
    [Rac,~]=size(ident);
    infoac=((ident(:,33:37))==repmat([0 0 1 0 0],Rac,1));
%vybere TC=4
    ident(sum(infoac,2)~=5,:)=[];
    char1=ident(:,41:46);
    char2=ident(:,47:52);
    char3=ident(:,53:58);
    char4=ident(:,59:64);
    char5=ident(:,65:70);
    char6=ident(:,71:76);
    char7=ident(:,77:82);
    char8=ident(:,83:88);

    CS=[binaryVectorToDecimal(char1)
binaryVectorToDecimal(char2) binaryVectorToDecimal(char3)
binaryVectorToDecimal(char4) binaryVectorToDecimal(char5)

```

```
binaryVectorToDecimal(char6) binaryVectorToDecimal(char7)
binaryVectorToDecimal(char8)];
```

```
CS(CS<27)=CS(CS<27)+64;
CS(CS==32)=CS(CS==32)+63;
CallSign=char(CS);
disp('Volací znak je')
disp(CallSign(1,:));
```

roll_angle.m

```
clear all
close all
```

```
%% Import data from text file.
% Script for importing data from the following text file:
%
% C:\Users\Tereza\ownCloud\PhD\Meteo
project\Archiv\1712141520.dat
%
% To extend the code to different selected data or a different
text file,
% generate a function instead of a script.

% Auto-generated by MATLAB on 2018/04/04 10:36:29

%% Initialize variables.
name='1801082200';
filename = ['./Archiv/',name, '.dat'];
delimiter = ';';

%% Format for each line of text:
% column4: text (%s)
% For more information, see the TEXTSCAN documentation.
formatSpec = '%*s%*s%*s%*s%[^\\n\\r]';

%% Open the text file.
fileID = fopen(filename,'r');

%% Read columns of data according to the format.
% This call is based on the structure of the file used to
generate this
% code. If an error occurs for a different file, try regenerating
the code
% from the Import Tool.
```

```

dataArray = textscan(fileID, formatSpec, 'Delimiter', delimiter,
'EmptyValue' ,NaN, 'ReturnOnError', false);

%% Close the text file.
fclose(fileID);

%% Post processing for unimportable data.
% No unimportable data rules were applied during the import, so
no post
% processing code is included. To generate code which works for
% unimportable data, select unimportable cells in a file and
regenerate the
% script.

%% Create output variable
Message = [dataArray{1:end-1}];

%% Clear temporary variables
clearvars filename delimiter formatSpec fileID dataArray ans;

        %program ponechá z původího datového balíčku pouze
extended
        %squitter zprávy (8D...), přeloží je do binárního formátu
uloží je
        %do matice MsgBin.mat, kterou je možné v
        %dalších skriptech načíst

%         unix_date=datestr(Unix_time/86400/1000 +
datenum(1970,1,1,0,0,0), 'yyyymmdd_HHMM'); %převod času z
unix_time do požadovaného formátu

%         ADSB=char(Message);
%         Time_ADSB=time;
%         SSR=char(Message);
%         Time_SSR=time;
%         Message_char=char(Message);

        [R,~]=size(Message);
%         a=0;
%         b=0;
        c=0;
        d=0;
        BDS_roll_angle=[];
tic
%         info=zeros(R,1);
        for k=1:R %all messages loop

```

```

        delka=length(Message{k,1}); %length of standard length
message shall be 28 characters

        if delka==28 %standard length messages
            Message_char=char(Message{k,1}); %converting to
character array
            MessageBIN=hex2bin2(Message{k,1}); %converting to
binnary message
            DF=bi2de(MessageBIN(1:5),'left-msb'); %DF code
decimal decoding

            if DF==20 || DF==21 %BDS register
                MessageBIN=hex2bin2(Message{k,1}); %binnary
message
                Adress_hex=crc_division4(MessageBIN); %ICAO
address decoding
                if Adress_hex=='4073A1'%ICAO address belongs to
aircraft in the area
                    BDS=MessageBIN(1,33:88);
                    BDS_number=Heuristic_algorithm_function(BDS);
                    d=d+1;
                    if BDS_number{1,1}==50 %BDS 50
                        c=c+1;
                        BDS_roll_angle(c,:)=BDS; %BDS 50 saving
                    end
                end
            end
        end
    end
end

decode_roll_angle=zeros(c,1);
RAdec=zeros(c,1);

%roll angle decoding
for j=1:c
    if BDS_roll_angle(j,1)==1 %status bit
        RAdec(j,1)=bi2de(BDS_roll_angle(j,2:11),'left-msb');
        if BDS_roll_angle(j,2)==0 %sign bit
            decode_roll_angle(j,1)=RAdec(j,1).*(45/256);
        elseif BDS_roll_angle(j,2)==1 %sign bit set at 1,
left wing down
            decode_roll_angle(j,1)=((RAdec(j,1)-1023).*(45/256));
        end
    else
        decode_roll_angle(j,1)=0;
    end
end
end
% end

```

Decoding.m

```
function [Output] =
Decoding(MessageInput, StatusBit, FieldStart, FieldEnd)

Decode=[]; %zero decoding
Decimal=[]; %saving variable

for a=1:size(StatusBit,2) %all status fields

Decode(1,a)=bi2de(MessageInput(1,FieldStart(1,a):FieldEnd(1,a)), '
left-msb');
    if (StatusBit(1,a)==0 && Decode(1,a)==0) || StatusBit(1,a)==1
%Zero condition, if status is set to zero all bits in following
field have to be set at zero
        Decimal(1,a)=Decode(1,a);
    else
        Decimal(1,a)=999999;
    end
end
Output=Decimal;
end
```

Heuristic_algorithm_function.m

```
function [BDS_number] = Heuristic_algorithm_function(Message)
%Distinguishing of BDS messages, assigning BDS_number

BDS_number_guess=zeros(1,9);

%Excluding zeros messages
ZeroCounter=sum(Message(1,1:56)==0); %number of zeros in a
message
if ZeroCounter(1,1)<=50 %testing of messages with more than 5
bits set at '1'

%Testing registers with BDS1 and BDS2 code
BDSidentifier=bi2de(Message(1,1:8), 'left-msb'); %saving BDS1
and BDS2 code in decimal scale

%BDS 1,0
if BDSidentifier==16 %hexadecimal 1,0 in decimal scale
    BDSOneZeroGuess=Message(1,:); %saving for following
testing
    OneZeroField(1,1)=bi2de(BDSOneZeroGuess(17:20), 'left-
msb'); %reserved values in field
```

```

        OneZeroField(1,2)=bi2de(BDSOneZeroGuess(21:23),'left-
msb'); %required values in field
        OneZeroField(1,3)=bi2de(BDSOneZeroGuess(29:32),'left-
msb'); %reserved values in field
        if OneZeroField(1,1)==0 && (OneZeroField(1,2)==0 ||
OneZeroField(1,2)==3 || OneZeroField(1,2)==4 ||
OneZeroField(1,2)==5) && OneZeroField(1,3)<=6 &&
BDSOneZeroGuess(1,33)==1 && BDSOneZeroGuess(1,35)==1 &&
ZeroCounter(1,1)>43 %conditions for BDS 1,0
            BDS_number_guess(1,1)=10; %BDS number saving
        end

        %BDS 2,0
        elseif BDSidentifier==32 %hexadecimal 2,0 in decimal scale
            BDSTwoZeroGuess=Message(1,:); %saving for following
testing
            IDField(1,1)=bi2de(BDSTwoZeroGuess(1,9:14),'left-
msb'); %field of characters
            IDField(1,2)=bi2de(BDSTwoZeroGuess(1,15:20),'left-
msb'); %field of characters
            IDField(1,3)=bi2de(BDSTwoZeroGuess(1,21:26),'left-
msb'); %field of characters
            IDField(1,4)=bi2de(BDSTwoZeroGuess(1,27:32),'left-
msb'); %field of characters
            IDField(1,5)=bi2de(BDSTwoZeroGuess(1,33:38),'left-
msb'); %field of characters
            IDField(1,6)=bi2de(BDSTwoZeroGuess(1,39:44),'left-
msb'); %field of characters
            IDField(1,7)=bi2de(BDSTwoZeroGuess(1,45:50),'left-
msb'); %field of characters
            IDField(1,8)=bi2de(BDSTwoZeroGuess(1,51:56),'left-
msb'); %field of characters
            NoDefined=[0 27:31 33:47]; %not allowed values
            for l=1:length(NoDefined) %loop of not allowed values
                if IDField(1,:)~=NoDefined(l) %testing of
allowed values
                    if IDField(1,1)~=32 || IDField(1,2)~=32 ||
IDField(1,3)~=32 || IDField(1,4)~=32 %testing intervening
spaces
                        BDS_number_guess(1,2)=20; %BDS number saving
                    end
                end
            end
        end

        %BDS 3,0
        elseif BDSidentifier==48 %hexadecimal 3,0 in decimal scale
            ThreeZeroField(1,1)=bi2de(Message(1,16:22),'left-msb');
            ThreeZeroField(1,2)=bi2de(Message(1,10:22),'left-msb');

```

```

        ThreeZeroField(1,3)=bi2de(Message(1,55:56),'left-msb');
        ThreeZeroField(1,4)=bi2de(Message(1,29:30),'left-msb');
        if (Message(1,9)==1 && Message(1,28)==0) ||
(Message(1,9)==1 && Message(1,28)==1) || (Message(1,9)==0 &&
Message(1,28)==1) && ThreeZeroField(1,1)==0
            if ThreeZeroField(1,4)==1 && ThreeZeroField(1,3)==0
                BDS_number_guess(1,3)=30;
            end
        elseif Message(1,9)==0 && Message(1,28)==0 &&
ThreeZeroField(1,2)==0
            if ThreeZeroField(1,4)==1 && ThreeZeroField(1,3)==0
                BDS_number_guess(1,3)=30;
            end
        end
    end
end

%BDS 1,7
OneSevenField(1,1)=bi2de(Message(1,26:56),'left-msb');
%reserved bits
if OneSevenField(1,1)==0 && ZeroCounter(1,1)>=40 %conditions
for BDS 1,7
    BDS_number_guess(1,9)=17; %BDS number saving
end

%Defining variables for EHS and MRAR registers
%significant bits for BDS 4,0
FourZeroStatusBit=[Message(1,1) Message(1,14) Message(1,27)
Message(1,48) Message(1,54)];
FourZeroStartBit=[2 15 28 49 55];
FourZeroEndBit=[13 26 39 51 56];

%significant bits for BDS 5,0
FiveZeroStatusBit=[Message(1,1) Message(1,12) Message(1,24)
Message(1,35) Message(1,46)];
FiveZeroStartBit=[2 13 25 36 47];
FiveZeroEndBit=[11 23 34 45 56];

%significant bits for BDS 6,0
SixZeroStatusBit=[Message(1,1) Message(1,13) Message(1,24)
Message(1,35) Message(1,46)];
SixZeroStartBit=[2 14 25 36 47];
SixZeroEndBit=[12 23 34 45 56];

%significant bits for BDS 4,4
FourFourStatusBit=[Message(1,5) Message(1,5) Message(1,24)
Message(1,35) Message(1,47) Message(1,50)];
FourFourStartBit=[6 15 25 36 48 51];
FourFourEndBit=[14 23 34 46 49 56];

```



```

    %significant bits for BDS 4,5
    FourFiveStatusBit=[Message(1,1) Message(1,4) Message(1,7)
Message(1,10) Message(1,13) Message(1,16) Message(1,27)
Message(1,39)];
    FourFiveStartBit=[2 5 8 11 14 17 28 40];
    FourFiveEndBit=[3 6 9 12 15 26 38 51];

    %Testing EHS registers
    %BDS 4,0
    FourZeroField(1,1)=bi2de(Message(1,29:31), 'left-msb');
%required values in field
    FourZeroField(1,2)=bi2de(Message(1,40:47), 'left-msb');
%reserved bits
    FourZeroField(1,3)=bi2de(Message(1,51:53), 'left-msb');
%reserved bits
    FourZero_OneCounter(1,1)=sum(Message(1,1:56)==1); %number of
ones
        if FourZeroField(1,1)==0 && FourZeroField(1,2)==0 &&
FourZeroField(1,3)==0 && FourZero_OneCounter(1,1)<27 %testing
conditions for BDS 4,0

DecodedFourZeroGuess=Decoding(Message,FourZeroStatusBit,FourZeroS
tartBit,FourZeroEndBit); %status bit testing and decoding
function
        if DecodedFourZeroGuess(1,1)<=2950 %maximum altitude
            if DecodedFourZeroGuess(1,2)<=2950 %maximum
altitude
                if DecodedFourZeroGuess(1,3)==0 ||
(DecodedFourZeroGuess(1,3)<=2220 &&
DecodedFourZeroGuess(1,3)>=2080) %maximum barometric pressure
                    if DecodedFourZeroGuess(1,4)==0 ||
DecodedFourZeroGuess(1,4)==2 || DecodedFourZeroGuess(1,4)==4
%possible acquired values
                        if DecodedFourZeroGuess(1,5)<=3
%possible acquired values
                            BDS_number_guess(1,4)=40; %BDS number
saving
                                end
                            end
                        end
                    end
                end
            end
        end

    %BDS 5,0
    if Message(1,25)==0 && Message(1,47)==0 && Message(1,48)==0
%testing of the most significant bits

```

```

DecodedFiveZeroGuess=Decoding(Message, FiveZeroStatusBit, FiveZeroStartBit, FiveZeroEndBit); %status bit testing and decoding function
    if DecodedFiveZeroGuess(1,1)<=170 ||
    (DecodedFiveZeroGuess(1,1)>=850 &&
    DecodedFiveZeroGuess(1,1)<=1024) %maximum roll angle,
    distinguishing condition
        if DecodedFiveZeroGuess(1,2)<=2048 %true track angle
            if DecodedFiveZeroGuess(1,3)<=270 %maximum ground
            speed
                if DecodedFiveZeroGuess(1,4)<=1024 %maximum
                track angle
                    if DecodedFiveZeroGuess(1,5)<=270
                    %maximum true airspeed
                        BDS_number_guess(1,5)=50; %BDS number
                        saving
                            end
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end

    %BDS 6,0
    if Message(1,14)==0 && Message(1,25)==0 && Message(1,26)==0
    && Message(1,35)==1 %testing of the most significant bits

DecodedSixZeroGuess=Decoding(Message, SixZeroStatusBit, SixZeroStartBit, SixZeroEndBit); %status bit testing and decoding function
    if DecodedSixZeroGuess(1,1)<=2048 %magnetic heading
        if DecodedSixZeroGuess(1,2)<=540 %maximum indicated
        airspeed
            if DecodedSixZeroGuess(1,3)<=230 %maximum speed
                if DecodedSixZeroGuess(1,4)<=130 ||
                (DecodedSixZeroGuess(1,4)>=884 && DecodedSixZeroGuess(1,4)<=1024)
                %maximum barometric altitude rate
                    if DecodedSixZeroGuess(1,5)<=124 ||
                    (DecodedSixZeroGuess(1,5)>=900 && DecodedSixZeroGuess(1,5)<=1024)
                    %maximum inertial vertical velocity
                        BDS_number_guess(1,6)=60; %BDS number
                        saving
                            end
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end
end
end

```

```

    %Testing MRAR registers
    %BDS 4,4
    FourZeroField(1,1)=bi2de(Message(1,1:4), 'left-msb');
    %FOM/SOURCE field decoding
    if (FourZeroField(1,1)==1 || FourZeroField(1,1)==2 ||
    FourZeroField(1,1)==3 || FourZeroField(1,1)==4) %FOM/SOURCE field
    testing

DecodedFourFourGuess=Decoding(Message, FourFourStatusBit, FourFourS
tartBit, FourFourEndBit); %status bit testing and decoding
function
    if DecodedFourFourGuess(1,1)<=80 %maximum wind speed
        if DecodedFourFourGuess(1,2)<=512 %wind direction
            if DecodedFourFourGuess(1,3)<=100 ||
            (DecodedFourFourGuess(1,3)>=750 &&
            DecodedFourFourGuess(1,3)<=1024) %static air temperature, changed
            limits
                if DecodedFourFourGuess(1,4)<=1080
                    %average static pressure
                    if DecodedFourFourGuess(1,5)<=3
                        %turbulence status
                        if DecodedFourFourGuess(1,6)<=64
                            %maximum humidity
                            BDS_number_guess(1,7)=44;
                            %BDS number saving
                            end
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end

    %BDS 4,5
    if BDS_number_guess(1,:)==0 %testing only if no other
    BDS number has been assigned
        FiveZeroField(1,1)=bi2de(Message(1,52:56), 'left-
    msb'); %reserved field decoding
        OnesValues=sum(Message(1,1:15)==1); %hazardous values
        set at 1 counting
        if FiveZeroField(1,1)==0 && OnesValues<=10 &&
        OnesValues>=4 %reserved field and hazardeous content testing

DecodedFourFiveGuess=Decoding(Message, FourFiveStatusBit, FourFives
tartBit, FourFiveEndBit); %status bit testing and decoding
function
    if DecodedFourFiveGuess(1,1)<=3 %turbulence

```

```

                                    if DecodedFourFiveGuess (1,2) <=3 %wind
shear
                                    if DecodedFourFiveGuess (1,3) <=3
%microburst
                                    if DecodedFourFiveGuess (1,4) <=3
%icing
                                                if
DecodedFourFiveGuess (1,5) <=3 %wake vortex
                                                if
DecodedFourFiveGuess (1,6) <=240 || (DecodedFourFiveGuess (1,6) >=704
&& DecodedFourFiveGuess (1,6) <=1024) %static air temperature
                                                if
DecodedFourFiveGuess (1,7) <=1080 && DecodedFourFiveGuess (1,7) >0
%maximum static pressure
                                                if
DecodedFourFiveGuess (1,8) <=2950 && DecodedFourFiveGuess (1,8) >0
%maximum altitude

BDS_number_guess (1,8) = 45; %BDS number saving
end
end
end
end
end
end
end
end
end
end
end
end
end
end
end

BDS_guess_counter (1,1) = sum (BDS_number_guess (1,1:9) == 0);
%BDS number counting

if BDS_guess_counter (1,1) == 9 %another BDS register
    BDS_final {1,1} = 'Unknown'; %final BDS number assignment

%BDS with sufficient testing (BDS 1,0 and BDS 2,0)
elseif BDS_number_guess (1,1) == 10
    BDS_final {1,1} = 10; %final BDS number assignment

elseif BDS_number_guess (1,2) == 20
    BDS_final {1,1} = 20; %final BDS number assignment

elseif BDS_guess_counter (1,1) == 8 %only one assigned BDS
number
    for j = 1:9
        if BDS_number_guess (1,j) ~ = 0 %choosing the one
assigned BDS number

```

```

        BDS_final{1,1}=BDS_number_guess(1,j); %final BDS
number assignment
    end
end
if BDS_number_guess(1,8)==45 %BDS 45 is not trasmitted
    BDS_final{1,1}='Unknown';
end

elseif BDS_guess_counter(1,1)==7 %two assigned BDS registers

%40 and 50 conflict
if BDS_number_guess(1,4)==40 && BDS_number_guess(1,5)==50
    BDS_final{1,1}=40; %final BDS number assignment
end

%44 and 17 conflict
if BDS_number_guess(1,7)==44 && BDS_number_guess(1,9)==17
    BDS_final{1,1}=17; %final BDS number assignment
end

%50 and 17 conflict
if BDS_number_guess(1,5)==50 && BDS_number_guess(1,9)==17
    BDS_final{1,1}=17; %final BDS number assignment
end

%50 and 60 conflict
if BDS_number_guess(1,5)==50 && BDS_number_guess(1,6)==60
    BDS_final{1,1}=60; %final BDS number assignment
end

%40 and 60 conflict
if BDS_number_guess(1,4)==40 && BDS_number_guess(1,6)==60
    OnesCounter=sum(Message(1,1:56)==1); %number of ones
    if OnesCounter<=15 %condition for assignment
        BDS_final{1,1}=40; %final BDS number assignment
    else
        BDS_final{1,1}=60; %final BDS number assignment
    end
end

%40 and 17 conflict
if BDS_number_guess(1,4)==40 &&
BDS_number_guess(1,9)==17;
    OnesCounter=sum(Message(1,1:56)==1); %number of ones
    if OnesCounter<=2 && Message(1,7)==1 &&
Message(1,16)==0; %condition for assignment
        BDS_final{1,1}=17; %final BDS number assignment
    else BDS_final{1,1}=40; %final BDS number assignment

```

```

        end
    end

    elseif BDS_guess_counter(1,1)==6 %three assigned BDS
registers

        %40, 50 and 17 conflict
        if BDS_number_guess(1,4)==40 && BDS_number_guess(1,5)==50
&& BDS_number_guess(1,9)==17
            OnesCounter=sum(Message(1,1:56)==1); %number of ones
            if OnesCounter>=4
                BDS_final{1,1}=17; %final BDS number assignment
            else
                BDS_final{1,1}='Unknown';
            end
        end
    end

        %40, 44 and 17 conflict
        if BDS_number_guess(1,4)==40 && BDS_number_guess(1,7)==44
&& BDS_number_guess(1,9)==17
            BDS_final{1,1}='Unknown'; %final BDS number
assignment
        end
    end
    BDS_number{1,1}=BDS_final{1,1};
end

```

crc_division4.m – upravené pro výpočet úhlu náklonu (v rámci algoritmu roll_angle.m)

```

function [Adress_hex]=crc_division4(dataBIN)
% dataBIN - celá správa v binárním formátu
% input=hex2bin([data]);
genpol=[1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 0 0 0 0 0 1 0 0 1];
[~,r]=deconv(dataBIN,genpol);
%quotient=mod(q,2); % Modulus after division, M = mod(X,Y) returns
X - n.*Y
remainder=mod(r,2);
Adress=remainder(1,(end-23):end);
Adress_hex=bin2hex(Adress); % převedení do hex
end

```

hex2bin2.m

```
function bin=hex2bin2(hex)

n=length(hex);
bin=zeros(1,4.*n);
for i=1:n
    if hex(i)=='F'
        bin((i*4)-3:i*4)=[1 1 1 1];
    elseif hex(i)=='E'
        bin((i*4)-3:i*4)=[1 1 1 0];
    elseif hex(i)=='D'
        bin((i*4)-3:i*4)=[1 1 0 1];
    elseif hex(i)=='C'
        bin((i*4)-3:i*4)=[1 1 0 0];
    elseif hex(i)=='B'
        bin((i*4)-3:i*4)=[1 0 1 1];
    elseif hex(i)=='A'
        bin((i*4)-3:i*4)=[1 0 1 0];
    elseif hex(i)=='9'
        bin((i*4)-3:i*4)=[1 0 0 1];
    elseif hex(i)=='8'
        bin((i*4)-3:i*4)=[1 0 0 0];
    elseif hex(i)=='7'
        bin((i*4)-3:i*4)=[0 1 1 1];
    elseif hex(i)=='6'
        bin((i*4)-3:i*4)=[0 1 1 0];
    elseif hex(i)=='5'
        bin((i*4)-3:i*4)=[0 1 0 1];
    elseif hex(i)=='4'
        bin((i*4)-3:i*4)=[0 1 0 0];
    elseif hex(i)=='3'
        bin((i*4)-3:i*4)=[0 0 1 1];
    elseif hex(i)=='2'
        bin((i*4)-3:i*4)=[0 0 1 0];
    elseif hex(i)=='1'
        bin((i*4)-3:i*4)=[0 0 0 1];
    elseif hex(i)=='0'
        bin((i*4)-3:i*4)=[0 0 0 0];
    end
end
```