

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

David Příhoda

Turbulence v úplavu

Bakalářská práce

2017

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

d ě k a n

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



K621..... **Ústav letecké dopravy**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

David Příhoda

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 – PIL – Profesionální pilot

Název tématu (česky): **Turbulence v úplavu**

Název tématu (anglicky): Wake Turbulence

Zásady pro vypracování

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

- Vznik a fyzikální zákonitosti turbulencí v úplavu
- Klasifikace letadel a rozestupy
- Rozbor nehod způsobených turbulencemi v úplavu
- Předcházení vzniku nehod a incidentů spojených s turbulencemi v úplavu



- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího bakalářské práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: BROŽ, Václav: Aerodynamika nízkých rychlostí. Praha: Vydavatelství ČVUT. 1995. ISBN 80-01-02347-8
ICAO: Doc 9426-AN/924 Air Traffic Services Planning Manual. Chapter 3 Wake Turbulence
Civil Aviation Authority of New Zealand: Wake Turbulence. Good Aviation Practise. 2008.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ladislav Capoušek, Ph.D.**

Datum zadání bakalářské práce: **28. října 2016**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **28. srpna 2017**
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. Stanislav Szabo, PhD. MBA
vedoucí
Ústavu letecké dopravy



prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek, dr. h. c.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

David Příhoda
jméno a podpis studenta

V Praze dne 28. října 2016

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat všem, kteří mi poskytli potřebné informace, konstruktivní rady a připomínky k tvorbě této bakalářské práce, zejména pak svému vedoucímu panu Ing. Ladislavu Capouškovi, Ph.D..

Prohlášení

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

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

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).

V Praze dne 27. srpna 2017



podpis

České Vysoké Učení Technické V Praze

Fakulta dopravní

Turbulence v úplavu

Bakalářská práce

David Příhoda

2017

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce „Turbulence v úplavu“ je poskytnout ucelený soubor informací o tomto jevu. Seznámit čtenáře s fyzikálními aspekty turbulence v úplavu, popsat minimální rozstupy používané v různých částech světa a příslušné kategorie letadel. Na jednotlivých nehodách a incidentech spojených s turbulencí v úplavu poukázat na jejich nejčastější příčiny. A závěrem doporučit způsoby, jak takovým situacím předcházet.

Abstract

The aim of this bachelor's thesis "Wake turbulence" is to provide comprehensive set of information linked to this phenomenon. The thesis familiarizes readers with the physical aspects of wake turbulence, describe minimum separations used in different parts of the world and the respective aircraft categories. In individual accidents and incidents associated with the wake turbulence, it points out their most frequent causes. Finally, it recommends ways to prevent such situations.

Klíčová slova

turbulence v úplavu, vír úplavu, rozstup, re-kategorizace, letecká nehoda

Key words

wake turbulence, wake vortex, separation, re-categorization, aviation accident

Obsah

| | |
|---|----|
| Seznam použitých zkratk | 7 |
| 1 Úvod | 9 |
| 2 Vznik a fyzikální zákonitosti turbulencí v úplavu | 10 |
| 2.1 Dopady turbulence v úplavu | 11 |
| 2.2 Vrtulníky | 12 |
| 3 Klasifikace letadel a rozstupy | 14 |
| 3.1 ICAO Dokument 4444 – PANS-ATM, Postupy pro navigační služby | 14 |
| 3.1.1 Minimální laterální rozstupy s ohledem na turbulenci v úplavu založené na čase | 14 |
| 3.1.2 Minimální laterální rozstupy s ohledem na turbulenci v úplavu založené na vzdálenosti | 18 |
| 3.2 RECAT-EU | 19 |
| 3.3 Postupy dle FAA | 23 |
| 3.3.1 Rozstupy dle FAA | 24 |
| 4 Rozbor incidentů a nehod spojených s turbulencemi v úplavu | 25 |
| 4.1 Severně Barstow, Kalifornie, USA, 8.6.1966 | 25 |
| 4.2 Tashkent, 16.1.1987 | 25 |
| 4.3 V blízkosti letiště Johna Weyna, Santa Ana, Kalifornie, USA, 15.12.1993 | 25 |
| 4.4 Nad Londýnem, Velká Británie, 5.9.1996 | 26 |
| 4.5 Wellington, Nový Zéland, 3.3.1997 | 26 |
| 4.6 Na letové trati, Santa Barbara, Kalifornie, USA, 2.9.1999 | 26 |
| 4.7 Švédsko, 20.9.1999 | 26 |
| 4.8 Na letové trati, Bristol, Velká Británie, 27.6.2000 | 26 |
| 4.9 V blízkosti letiště JFK, New York, USA, 12.11.2001 | 27 |
| 4.9.1 Počáteční teorie příčiny nehody | 27 |
| 4.9.2 Teorie mechanické závady | 28 |
| 4.9.3 Odhalení skutečné příčiny nehody | 29 |
| 4.9.4 Nedostatky výcviku American Airlines | 30 |
| 4.9.5 Doporučení vyšetřovací komise | 30 |

| | |
|---|----|
| 4.10 Na letové trati severovýchod Španělska, 28.5.2006 | 31 |
| 4.11 Na letové trati poblíž Oroville, Washington, USA, 10.1.2008 | 31 |
| 4.12 Hurlburt Field, Florida, USA, 8.7.2008 | 31 |
| 4.13 V blízkosti Sydney, Austrálie, 3.11.2008 | 31 |
| 4.14 Humberside, Velká Británie, 26.9.2009 | 32 |
| 4.15 Poblíž Frankfurtu, SRN, 13.12.2011 | 32 |
| 4.16 Braunschweig, SRN, 9.9.2012..... | 32 |
| 4.16.1 Obecné informace..... | 33 |
| 4.16.2 Parametry zúčastněných letadel | 33 |
| 4.16.3 Primární cirkulace | 34 |
| 4.16.4 Chování úplavu a jeho rozpad..... | 35 |
| 4.16.5 Postup (pohyb) vírů úplavu | 35 |
| 4.16.6 Proudové pole..... | 36 |
| 4.16.7 Reakce letounu na turbulenci v úplavu..... | 38 |
| 4.16.8 Celkový průběh nehody | 39 |
| 4.16.9 Ověřovací letové zkoušky | 40 |
| 4.16.10 Závěr vyšetřování | 41 |
| 4.17 Na letové trati, Ishioka, Japonsko, 29.4.2014 | 41 |
| 4.18 Na letové trati nad Arabským mořem, 7.1.2017 | 42 |
| 5 Předcházení vzniku incidentů a nehod spojených s turbulencemi v úplavu..... | 43 |
| 5.1 Obecná doporučení pro piloty všeobecného letectví | 43 |
| 5.1.1 Vzlet..... | 43 |
| 5.1.2 Stoupání | 44 |
| 5.1.3 Křížování..... | 45 |
| 5.1.4 Následování..... | 45 |
| 5.1.5 Míjení na vstřícném kurzu | 45 |
| 5.1.6 Přiblížení..... | 45 |
| 5.1.7 Přistání | 45 |
| 5.1.8 Křížující se dráhy | 46 |

| | |
|--|----|
| 5.1.9 Boční vítr | 47 |
| 5.1.10 Vybírání nezvyklých poloh způsobených turbulencí v úplavu | 47 |
| 5.2 Vlastní doporučení a případné inovace | 48 |
| 5.2.1 Všeobecné letectví, lety VFR, neřízená letiště | 48 |
| 5.2.2 Obchodní letecká doprava, lety IFR, řízená letiště | 48 |
| 6 Závěr | 50 |
| 7 Seznam použité literatury..... | 52 |
| 8 Seznam obrázků..... | 55 |
| 9 Seznam tabulek | 57 |

Seznam použitých zkratek

| | |
|-------------|---|
| 25C | dráha 25 střední |
| 25L | dráha 25 levá |
| AFIS | Aerodrome Flight Information Service |
| CAT | Category |
| CVR | Cockpit Voice Recorder |
| EUROCONTROL | European Organization for the Safety of Air Navigation |
| FAA | Federal Aviation Administration |
| FDR | Flight Data Recorder |
| FL | Flight Level |
| ICAO | International Civil Aviation Organization |
| IFR | Instrument Flight Rules |
| LIDAR | Light Detection And Ranging |
| MTOM | Maximum Take Off Mass |
| MTOW | Maximum Take Off Weight |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration |
| NM | Nautical Mile |
| PANS-ATM | Procedures For Air Navigation Services – Air Traffic Management |
| PWS | Pair Wise Separation |
| RADAR | Radio Detection And Ranging |
| RCR | Roll Control Ratio |
| RECAT-EU | European Wake Vortex Re-categorisation |
| SID | Standard Instrument Departure |

| | |
|-----|----------------------------------|
| SRN | Spolková republika Německo |
| VFR | Visual Flight Rules |
| VMC | Visual Meteorological Conditions |
| WTC | Wake Turbulence Category |
| WVC | Wake Vortex Category |
| WVE | Wake Vortex Encounter |

1 Úvod

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 úplavy a 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.

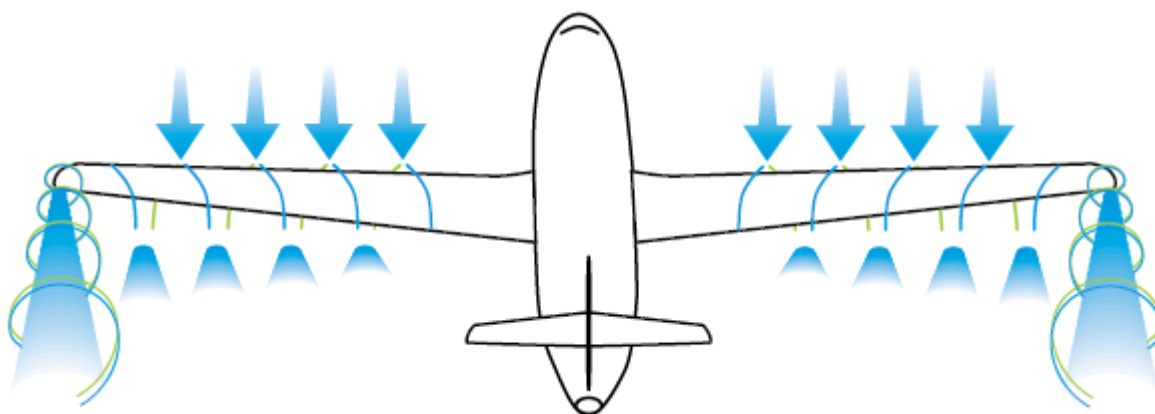
Po druhé světové válce s příchodem velkého rozmachu civilního letectví a s nástupem proudových dopravních letadel bylo nutné turbulenci v úplavu začít věnovat větší pozornost a s přibývajícím stroji na obloze zavést minimální rozstupy mezi nimi. I přes tato opatření došlo k řadě nehod způsobených turbulencí 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. Nesmíme však zapomínat, že tento neviditelný rotující zabiják se i dnes za letadly táhne stejně jako v počátcích letectví před více než 100 lety.

Téma bakalářské práce jsem si vybral právě z důvodu, jak je turbulence v úplavu neodmyslitelně spjata se všemi odvětvími letectví. Cílem práce je čtenáře seznámit v jednotlivých kapitolách s fyzikálními zákonitostmi, které vznik a chování tohoto jevu ovlivňují. S předpisovou stránkou a systémy rozstupů používaných v různých částech světa pro zachování vysoké bezpečnosti v letectví. Moderními trendy v dané problematice a možným vývojem nových optimalizovaných rozstupů pro zvýšení kapacity letišť. V neposlední řadě práce ukazuje na rozborech jednotlivých nehod nejčastější příčiny nehod a incidentů spojených s turbulencí v úplavu. Na závěr práce doporučuje, jak takovým situacím předcházet, ať výcvikem pilotů, nebo použitím moderních technologií pro včasné varování. Problematika turbulence v úplavu je zpracována již několik desetiletí na vysoké úrovni, avšak všude je potřeba posouvat se kupředu a v letectví to platí především. Věřím, že tato práce bude důstojným uceleným materiálem pro odbornou leteckou veřejnost, která se o tomto jevu chce dozvědět více.

2 Vznik a fyzikální zákonitosti turbulencí v úplavu

Turbulence v úplavu (přesněji nazývaná indukované víry) 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. Vzduch se přirozeně pohybuje z oblasti o vyšším tlaku do oblasti o nižším tlaku, a tak na konci křídla přetéká ze spodní (tlakové) strany na horní (sací) stranu křídla. Podobně také vznikají malé víry po celé délce odtokové hrany. Při dopředném pohybu letadla v prostoru se tak za koncem každého křídla tvoří protiběžné vírové proudění – úplav [1, 2].



Obrázek 1 Pohled zezadu na letadlo produkující víry úplavu, levý vír rotuje ve směru hodinových ručiček, pravý proti směru hodinových ručiček [3]

Toto 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 hodnoty až 100 m/s. 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 jejich života 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. [1, 3].

Pokud se jiné letadlo setká s turbulencí v úplavu, označuje se tato situace jako Wake Vortex Encounter (WVE) [1].

Síla vírů úplavu závisí na vztlaku a rychlosti letadla a také na tvaru 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. Jelikož rychlost i tvar křídla vzhledem k jeho okamžité konfiguraci jsou proměnlivé faktory pro určování síly turbulence v úplavu (v klasický ICAO kategoriích) se používá hmotnost letounu, která je v dané situaci více méně konstantní. Síla úplavu roste přímo úměrně se zvyšující se hmotností. Pro potřeby separace letounů z důvodu turbulence v úplavu se používá k jejich kategorizaci (WTC), až na výjimky, maximální vzletová hmotnost (MTOW / MTOM) [1, 3].

2.1 Dopady turbulence v úplavu

Největším nebezpečím turbulence v úplavu je indukované klonění a zatáčení. To je zejména nebezpečné při vzletu a přistání, kdy se letadlo pohybuje ve výšce příliš malé pro vybrání nekontrolovatelného chování stroje. Nejvíce jsou turbulencí v úplavu ohrožena letadla s malým rozpětím křídel [3].

Efekt turbulence v úplavu na letadlo závisí na mnoha faktorech, jak již bylo zmíněno výše, zejména závisí na hmotnosti a rozpětí křídel následujícího stroje a také na jeho relativní poloze vůči ose indukovaných vírů. Ve své nejmírnější formě se může turbulence v úplavu projevat jen mírným kmitáním křídel, podobně jako mechanická turbulence. Ve své nejhorší formě může dojít k úplné ztrátě říditelnosti letounu. Možnost vybrání extrémních poloh při zasažení silnou turbulencí v úplavu závisí na výšce letu, manévrovatelnosti letounu a jeho výkonu / tahu [3].

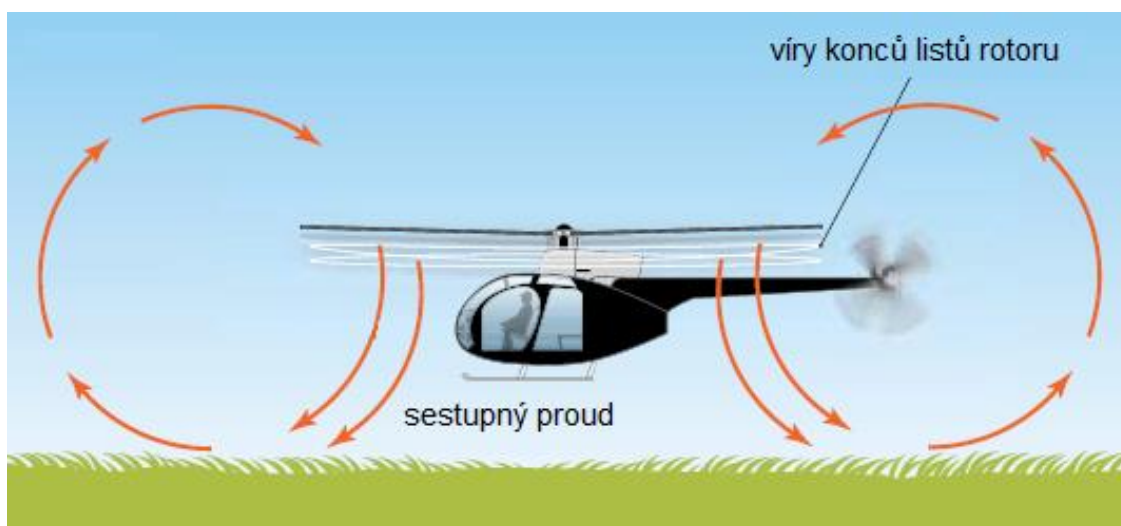
Nejnebezpečnější situace je, pokud malé letadlo vlétne přímo do úplavu většího stroje. K tomu může dojít, když letí pod úrovní trajektorie většího letounu. Letové zkoušky prokázaly, že v takovém případě lze očekávat velmi silné klonivé momenty, nebo dočasnou úplnou ztrátu kontroly nad řízením. Pokud zasažené letadlo letí mezi oběma víry, lze vlivem směru jejich rotace očekávat silný klesavý proud, překračující vertikální rychlost 1 000 stop za minutu. V případě vlétnutí do úplavu šikmo, podle letových zkoušek je letadlo vystaveno kombinaci klonivých a klopivých momentů, které většinou vedou k vychýlení ven z úplavu. Studie ukázaly, že největší riziko incidentu nebo nehody spojené s turbulencí v úplavu nastává, když lehké letadlo dotáhčí čtvrtou zatáčku na konečné přiblížení za těžkým, které provádí přímé přiblížení. Zasažený stroj prolétává víry v pravém úhlu na jejich osy, což vyvolá krátké silné

klopivé momenty, což může vést k překročení maximálního provozního násobku zatížení a poškození konstrukce letadla [3].

2.2 Vrtulníky

V závislosti na velikosti vrtulníku, může být produkována výrazná turbulence v úplavu. Přesto menší stroje mohou produkovat podobně silnou turbulenci v úplavu jako těžší vrtulníky, protože dvoulistý rotor (typický pro menší vrtulníky) způsobuje silnější víry než systémy s více rotorovými listy. Síla vírů úplavu za vrtulníky může být výrazně větší než u letadla s pevnými křídly při stejné hmotnosti. Nejsilnější úplav vzniká při letu vrtulníku nízkou rychlostí (20-50 uzlů). Většina nehod spojená s vrtulníky nastala při vzletu nebo přistání malého letadla, když vrtulník visel v blízkosti vzletové a přistávací dráhy nebo letěl po letištním okruhu. Vrtulník produkuje různé formy turbulence v úplavu v závislosti na režimu letu:

- a) Během visení na místě nebo pomalém vzdušném pojíždění, pod vrtulníkem vzniká značný sestupný proud přecházející v proud vírů proudících pryč od osy rotoru vrtulníku, ty sahají přibližně do vzdálenosti trojnásobku průměru hlavního rotoru. V této vzdálenosti víry proudí nahoru a rozptylují se směrem od hlavního rotoru.
- b) Během dopředného letu vrtulníky produkují dvojici spirálovitých vírů za rotorovými listy, úplav vzniká též rotujícím vzduchem pod trupem. V této situaci je turbulence v úplavu podobná té, jaká vzniká u většího letadla s pevnými křídly [3].



Obrázek 2 Zjednodušené proudění okolo vrtulníku při visení na místě v blízkosti země [3]



Obrázek 3 Zjednodušené indukované víry produkované vrtulníkem během dopředného letu [3]

Letové zkoušky prokázaly, že turbulence v úplavu vzniká různě, v závislosti na počasí a zdali vrtulník klesá nebo stoupá. Indukované víry jsou blíže u sebe během stoupání, a naopak dále při klesání. Na rozdíl od vírů produkovaných letadly s pevnými křídly, ty za vrtulníky neklesají předpověditelným způsobem a někdy dokonce zůstávají v přibližně stejné výšce ve, které vznikly. Plocha ovlivněná úplavem za vrtulníkem je vždy větší, než plocha zasažená úplavem letadla s pevnými křídly porovnatelné velikosti a hmotnosti [3].

3 Klasifikace letadel a rozstupy

3.1 ICAO Dokument 4444 – PANS-ATM, Postupy pro navigační služby

Minimální rozstupy z hlediska turbulence v úplavu jsou založeny na rozdělení letadel do skupin podle maximální certifikované vzletové hmotnosti následovně:

- 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 [4]

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

- 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 [5].

Všechna letadla spadající pod kategorii turbulence v úplavu HEAVY musí při prvním radiovém kontaktu s řízením letového provozu použít slovo „heavy“ ihned po svém volacím znaku [6].

Vrtulníky by měly být udržovány v dostatečné vzdálenosti od lehkých letadel při visení a vzdušném pojiždění, protože produkují silnější víry úplavu než letadlo s pevnými křídly, vztaženo na 1 kg maximální vzletové hmotnosti, a to zejména při nízkých rychlostech, přibližně do 50 uzlů [6].

3.1.1 Minimální laterální rozstupy s ohledem na turbulenci v úplavu založené na čase

Po stanovišti řízení letového provozu se nevyžaduje, aby zajišťovalo rozstupy mezi letadly s ohledem na turbulenci v úplavu pro:

- a) přilétávající lety VFR, před nimiž přistávalo letadlo kategorie HEAVY nebo MEDIUM
- b) lety IFR provádějících vizuální přiblížení, po ohlášení, že mají předcházející letadlo v dohledu a po oznámení, že mají udržovat rozstup od toho letadla dle vlastního uvážení

Ve výše uvedených případech může stanoviště řízení letového provozu, pokud to považuje za nutné, upozornit pilota na rizika turbulence v úplavu těžšího stroje, avšak odpovědnost za dodržení bezpečného rozstupu je na velícím pilotovi druhého letadla v pořadí. Ten rozhodne, zda stávající rozstup je dostatečný, nebo je nutné jej zvětšit. V tomto případě informuje o změně stanoviště řízení letového provozu [6].

Minimální rozstupy při přiblížení

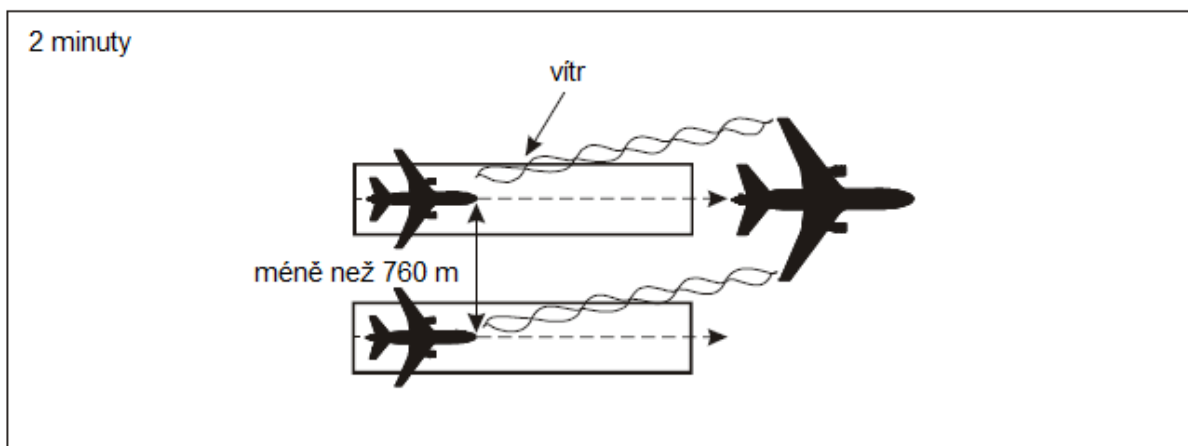
Kromě případů uvedených výše, se použijí tyto rozstupy s ohledem na turbulenci v úplavu při přiblížení na přistání:

- a) letadlo kategorie MEDIUM za HEAVY – 2 minuty
- b) kategorie LIGHT za HEAVY nebo MEDIUM – 3 minuty [6]

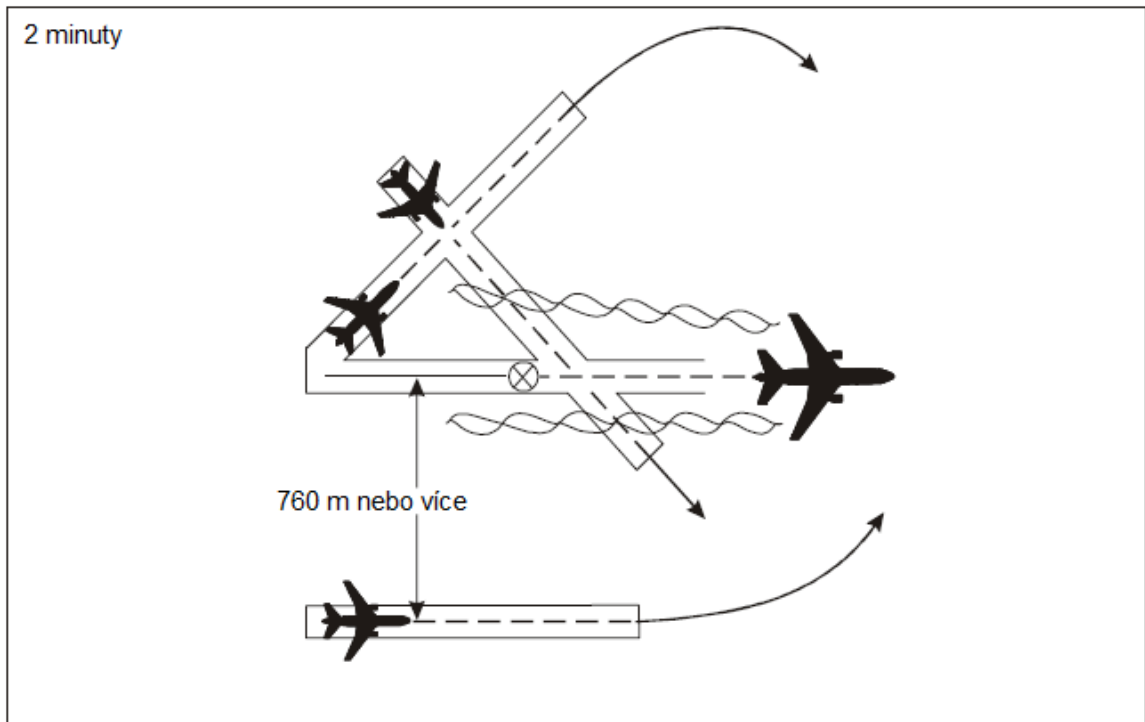
Minimální rozstupy při vzletu

Minimální rozstup 2 minuty by měl být použit v případě, že letadlo kategorie LIGHT nebo MEDIUM vzlétá za letadlem kategorie HEAVY, nebo letadlo kategorie LIGHT vzlétá za letadlem kategorie MEDIUM, pokud použije:

- a) stejnou vzletovou a přistávací dráhu
- b) paralelní dráhu vzdálenou méně než 760 m (2 500 stop)
- c) křížící se dráhu a předpokládaná trajektorie druhého letadla protíná předpokládanou trajektorii prvního ve stejné výšce, nebo ve výšce o méně než 300 m (1 000 stop) nižší
- d) paralelní dráhu vzdálenou více než 760 m (2 500 stop) a předpokládaná trajektorie druhého letadla protíná předpokládanou trajektorii prvního ve stejné výšce, nebo ve výšce o méně než 300 m (1 000 stop) nižší [6]



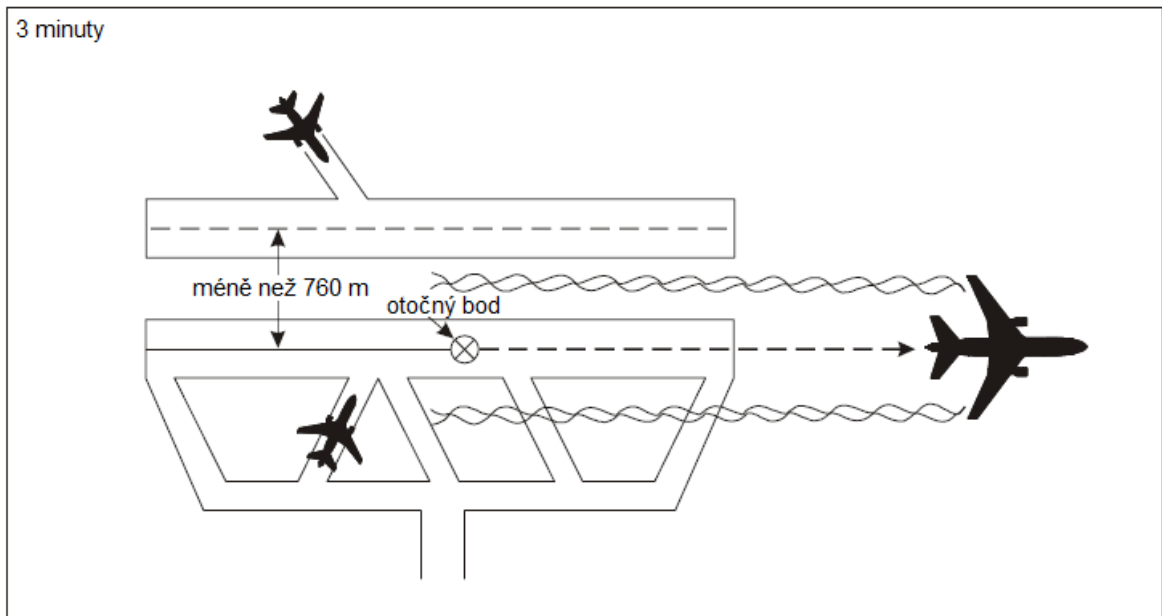
Obrázek 4 Dvouminutový rozstup pro následující letadlo [6]



Obrázek 5 Dvouminutový rozstup z důvodu turbulence v úplavu pro křížující letadlo [6]

Minimální rozstup 3 minuty by měl být použit v případě, že letadlo kategorie LIGHT nebo MEDIUM vzlétá za letadlem kategorie HEAVY, nebo letadlo kategorie LIGHT vzlétá za letadlem kategorie MEDIUM, pokud použije:

- a) ke vzletu křižovatku stejné vzletové a přistávací dráhy
- b) ke vzletu křižovatku paralelní dráhy vzdálené méně než 760 m (2 500 stop) [6]



Obrázek 6 Tříminutový rozstup pro následující letadlo [6]

Posunutý práh dráhy

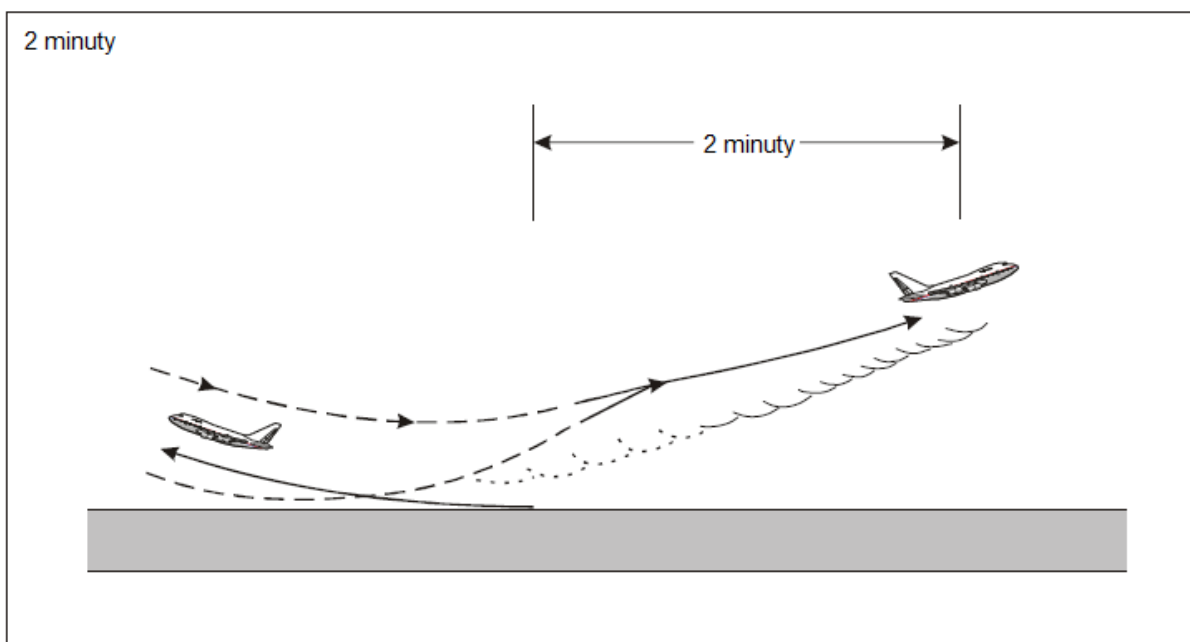
Minimální rozstup 2 minuty by měl být použit mezi letadly kategorie LIGHT nebo MEDIUM a letadlem kategorie HEAVY, nebo mezi letadlem kategorie LIGHT a letadlem kategorie MEDIUM, při používání dráhy s posunutým prahem když:

- a) odlétající letadlo kategorie LIGHT nebo MEDIUM následuje přistávající letadlo kategorie HEAVY, nebo když odlétající letadlo kategorie LIGHT následuje přistávající letadlo kategorie MEDIUM
- b) přistávající letadlo kategorie LIGHT nebo MEDIUM následuje odlétající letadlo kategorie HEAVY, nebo když letadlo kategorie LIGHT následuje odlétající letadlo kategorie MEDIUM, pokud se předpokládá protnutí zamýšlených trajektorií [6]

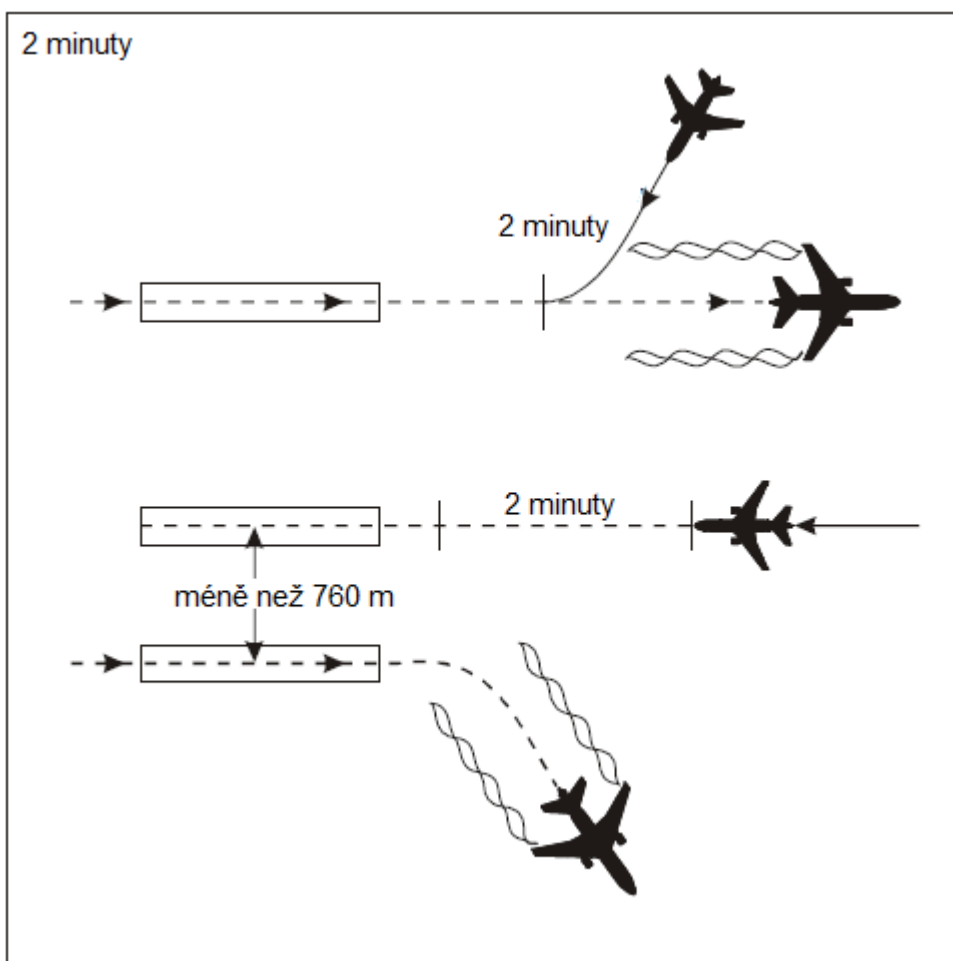
Opačný směr vzletu

Minimální rozstup 2 minuty by měl být použit mezi letadly kategorie LIGHT nebo MEDIUM a letadlem kategorie HEAVY, nebo mezi letadlem kategorie LIGHT a letadlem kategorie MEDIUM, když těžší letadlo provádí průlet nad dráhou, nebo postup nezdařeného přiblížení a lehčí letadlo:

- a) se chystá použít stejnou dráhu v opačném směru ke vzletu
- b) přistává na stejné dráze v opačném směru, nebo v opačném směru na paralelní dráze vzdálené méně než 760 m (2 500 stop) [6]



Obrázek 7 Dvouminutový rozstup pro letadlo vzletající v opačném směru [6]



Obrázek 8 Dvouminutový rozstup pro letadlo přistávající v opačném směru [6]

3.1.2 Minimální laterální rozstupy s ohledem na turbulenci v úplavu založené na vzdálenosti

Rozstupy založené na vzdálenosti se používají zejména při přiblížení v prostoru s radarovým pokrytím (což je v dnešní době drtivá většina řízených letišť). Při použití těchto rozstupů jsou letadla rozdělena dle ICAO do stejných kategorií jako u rozstupů založených na čase.

Tabulka 1 Rozstupy založené na vzdálenosti podle ICAO [7]

| vedoucí / následující | A380-800 | HEAVY | MEDIUM | LIGHT |
|-----------------------|----------|-------|--------|-------|
| A380-800 | | 6 NM | 7 NM | 8 NM |
| HEAVY | | 4 NM | 5 NM | 6 NM |
| MEDIUM | | | | 5 NM |
| LIGHT | | | | |

Airbus A380 podle kategorizace ICAO spadá do kategorie HEAVY, která nemá stanoven horní limit, avšak vzhledem k maximální vzletové hmotnosti 560 000 kg a s tím spojené síle turbulencí v úplavu jsou pro tento letoun doporučovány zvýšené rozstupy dle tabulky výše.

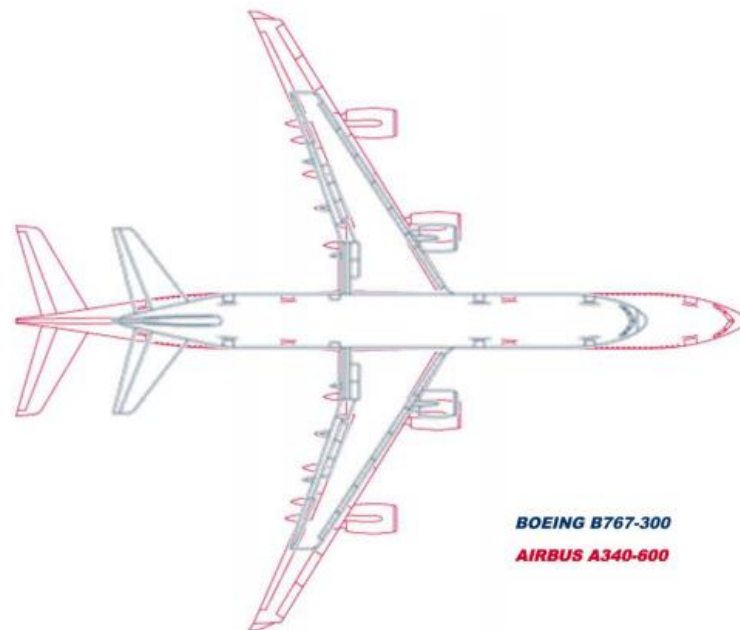
Pokud není stanoven minimální rozstup z důvodu turbulence v úplavu použije se:

- a) minimální radarový rozstup, který činí 3 NM (nebo 2,5 NM, pokud jsou splněny podmínky stanovené v ICAO Dokumentu 4444)
- b) takový rozstup, který je stanoven příslušným úřadem řízení letového provozu [7]

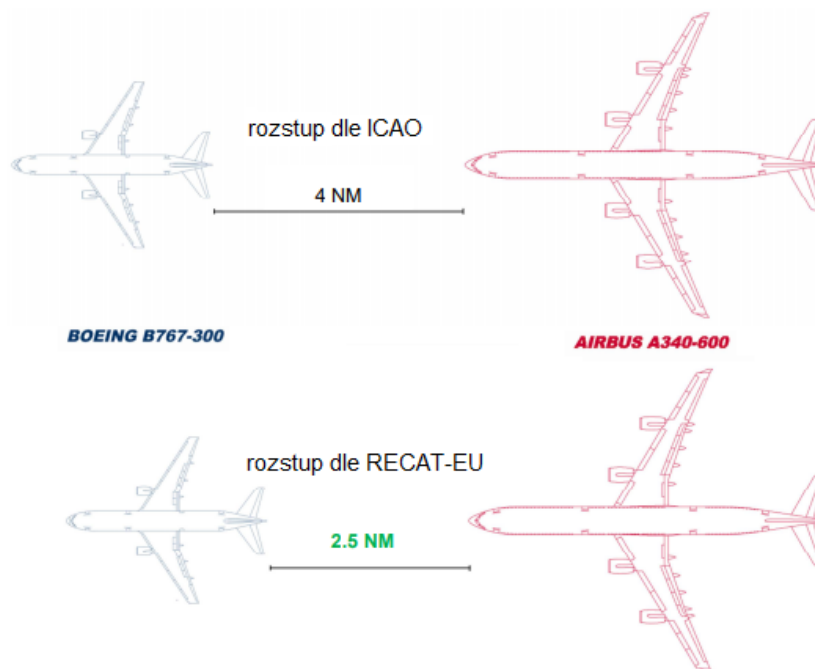
3.2 RECAT-EU

Evropská letiště donedávna používala k zajišťování rozstupů standardy podle ICAO Dokumentu 4444, které jsou již více než 40 let staré a rozdělují všechna letadla pouze do třech kategorií. Proto do stejné kategorie spadají letadla značně odlišných rozměrů, a tudíž i síly turbulence v úplavu. 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, jsou rozstupy mezi některými typy strojů 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 vznikuvšími kategoriemi letadel. Podle RECAT-EU je vytvořeno šest kategorií namísto původních čtyř, včetně začlenění neoficiální kategorie super heavy pro A380 což slibuje zvýšení kapacity letišť v nejvytíženějších hodinách až o 8 %. Prvním letišťem, na kterém byl v březnu roku 2016 zahájen zkušební provoz podle RECAT-EU, se stalo letiště Charlese de Gaulla Paříž [8].

EUROCONTROL plánuje v návaznosti na RECAT-EU vývoj pokročilého systému zajišťování přesných rozstupů pro každý ze 115 nejrozšířenějších komerčně používaných letounů. Nový model bude používat tak zvaný „Pair Wise Separation“ (PWS) systém neboli systém přesných rozstupů pro danou dvojici letadel (jeden typ vedoucí a druhý následující, který by se potenciálně mohl setkat s úplavem prvního stroje). Tento systém označovaný jako Recat 2 a Recat 3 se plánuje zavést do provozu na evropských letištích do roku 2020 respektive 2022 [8].



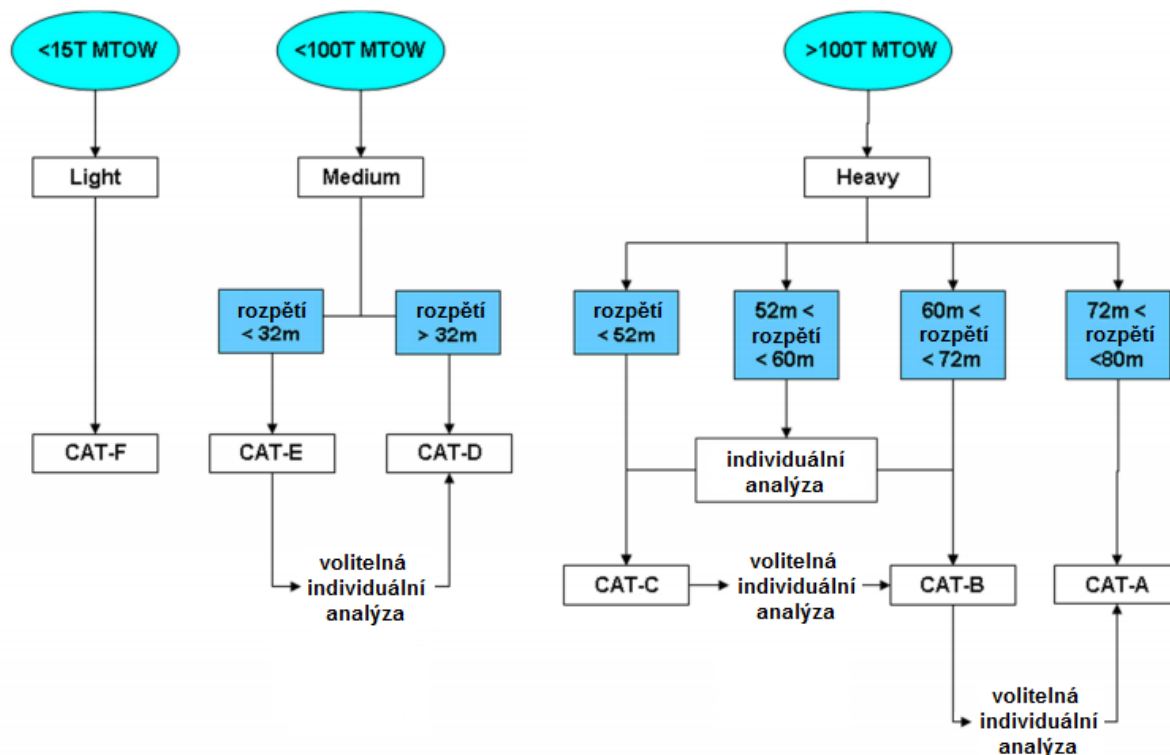
Obrázek 9 Porovnání siluet dvou letounů spadajících podle ICAO do stejné kategorie HEAVY [7]



Obrázek 10 Změna rozstupů podle RECAT-EU mezi letouny, které oba spadají do kategorie HEAVY podle ICAO [7]

Podle RECAT-EU jsou všechny typy letadel rozděleny do šesti kategorií CAT-A až CAT-F v závislosti na turbulenci v úplavu. 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 11 [7].



Obrázek 11 Schéma rozdělení letadel do nových kategorií podle RECAT-EU [7]

Tabulka 2 Rozstupy pro přiblížení nebo vzlet založené na vzdálenosti podle REACT-EU [7]

| vedoucí / následující | | SUPER HEAVY | UPPER HEAVY | LOWER HEAVY | UPPER MEDIUM | LOWER MEDIUM | LIGHT |
|-----------------------|-------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------|
| | | CAT-A | CAT-B | CAT-C | CAT-D | CAT-E | CAT-F |
| SUPER HEAVY | CAT-A | 3 NM | 4 NM | 5 NM | 5 NM | 6 NM | 8 NM |
| UPPER HEAVY | CAT-B | | 3 NM | 4 NM | 4 NM | 5 NM | 7 NM |
| LOWER HEAVY | CAT-C | | | 3 NM | 3 NM | 4 NM | 6 NM |
| UPPER MEDIUM | CAT-D | | | | | | 5 NM |
| LOWER MEDIUM | CAT-E | | | | | | 4 NM |
| LIGHT | CAT-F | | | | | | 3 NM |

V prázdných polích tabulky není stanoven minimální rozstup z důvodu turbulence v úplavu a platí zde minimální radarový rozstup 3 respektive 2,5 NM [7].

Tabulka 3 Rozstupy pro vzlet založené na čase podle REACT-EU [7]

| vedoucí / následující | | SUPER HEAVY | UPPER HEAVY | LOWER HEAVY | UPPER MEDIUM | LOWER MEDIUM | LIGHT |
|-----------------------|-------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------|
| | | CAT-A | CAT-B | CAT-C | CAT-D | CAT-E | CAT-F |
| SUPER HEAVY | CAT-A | | 100 s | 120 s | 140 s | 160 s | 180 s |
| UPPER HEAVY | CAT-B | | | | 100 s | 120 s | 140 s |
| LOWER HEAVY | CAT-C | | | | 80 s | 100 s | 120 s |
| UPPER MEDIUM | CAT-D | | | | | | 120 s |
| LOWER MEDIUM | CAT-E | | | | | | 100 s |
| LIGHT | CAT-F | | | | | | 80 s |

Tabulka 4 Rozdíl rozstupů založených na vzdálenosti (ICAO / RECAT-EU) [7]

| vedoucí / následující | | SUPER HEAVY | UPPER HEAVY | LOWER HEAVY | UPPER MEDIUM | LOWER MEDIUM | LIGHT |
|-----------------------|-------|-------------|--------------|-------------|--------------|--------------|---------|
| | | CAT-A | CAT-B | CAT-C | CAT-D | CAT-E | CAT-F |
| SUPER HEAVY | CAT-A | +0,5 NM | -2 NM | -1 NM | -2 NM | -1 NM | |
| UPPER HEAVY | CAT-B | | -1 NM | | -1NM | | |
| LOWER HEAVY | CAT-C | | -1 (-1,5) NM | -1 NM | -2 NM | -1 NM | |
| UPPER MEDIUM | CAT-D | | | | | | |
| LOWER MEDIUM | CAT-E | | | | | | -1 NM |
| LIGHT | CAT-F | | | | | | +0,5 NM |

Tabulka 5 Rozdíl rozstupů založených na čase (ICAO / RECAT-EU) [7]

| vedoucí / následující | | SUPER HEAVY | UPPER HEAVY | LOWER HEAVY | UPPER MEDIUM | LOWER MEDIUM | LIGHT |
|-----------------------|-------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------|
| | | CAT-A | CAT-B | CAT-C | CAT-D | CAT-E | CAT-F |
| SUPER HEAVY | CAT-A | | -20 s | | -40 s | -20 s | |
| UPPER HEAVY | CAT-B | | | | -20 s | | +20 s |
| LOWER HEAVY | CAT-C | | | | -40 s | -20 s | |
| UPPER MEDIUM | CAT-D | | | | | | |
| LOWER MEDIUM | CAT-E | | | | | | -20 s |
| LIGHT | CAT-F | | | | | | +20 s |

3.3 Postupy dle 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:

- 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 vzlakovou mechanizací tohoto stroje [8].

3.3.1 Rozstupy dle FAA

Pro vzlety se obecně používá (podobně jako podle ICAO) rozstup nejméně 2 minuty pro letadlo nižší WVC za letadlem vyšší WVC při vzletu ze stejné pozice. Při vzletu z křižovatky se v takovém případě použije rozstup nejméně 3 minuty [8].

Tabulka 6 Rozstupy založené na vzdálenosti pro přiblížení podle FAA [8]

| vedoucí letadlo | následující letadlo | minimální radarový rozstup |
|-----------------|---------------------|----------------------------|
| SUPER | SUPER | 4 NM |
| | HEAVY | 6 NM |
| | LARGE | 7 NM |
| | SMALL | 8 NM |
| HEAVY nebo B757 | HEAVY | 4 NM |
| | LARGE | 5 NM |
| | SMALL | 6 NM |
| LARGE | SMALL | 4 NM |

Podobně jako EUROCONTROL přišel se svým RECAT-EU (viz výše). I americký FAA začal vyvíjet svůj nový systém re-kategorizace letadel podle turbulence v úplavu ještě o několik let dříve, aby navýšil kapacity letišť a celkově zefektivnil provoz na nich. Podobně jako evropský model i americký RECAT Phase I dělí letadla do šesti kategorií, a to nejen podle maximální vzletové hmotnosti, ale taky podle maximální přistávací hmotnosti, rozpětí křídel a rychlosti na přiblížení. Prvním letišťem, kde byl nový systém rozstupů použit, bylo letiště v Memphisu, hlavní základna společnosti FedEx zaznamenala nárůst kapacity o 15 %. V dubnu 2016 byl systém implementován na dalších 17 letišť a 10 terminálních oblastí ve Spojených státech amerických. FAA chce pokračovat dále v optimalizaci systému rozstupů v závislosti na turbulenci v úplavu podobných způsobem jako EUROCONTROL a ve svém RECAT Phase II plánuje zavedení přesných rozstupů pro určitou dvojici letadel [8].

4 Rozbor incidentů a nehod spojených s turbulencemi v úplavu

4.1 Severně Barstow, Kalifornie, USA, 8.6.1966

Prototyp amerického nadzvukového bombardéru XB-70 Valkyrie se zřítil po srážce s F-104 Starfighter během skupinového fotografického letu spolu s dalšími vojenskými letouny (F-4, F-5, T-38). Let byl proveden pro potřeby firmy General Electric, jejíž motory všechny tyto letouny pohání. Po srážce F-104 okamžitě explodoval, aniž by měl pilot šanci letoun nouzově opustit, poničená XB-70 se nekontrolovatelně zřítila, kopilot se stačil katapultovat, kapitán zahynul. Podle vyšetřování byla příčinou nehody špatná pozice Starfighteru ve formaci, ze které neměl pilot dobrý výhled na křídlo Valkyrie a laterální rozstup odhadoval pouze pohledem na trup. Příliš se přiblížil a zasáhl konec pravého křídla bombardéru. Zásadní roli také hrál rozsáhlý úplav XB-70, protože po kontaktu s pravým křídlem se F-104 přetočil na záda a narazil do zadní části Valkyrie [8].

4.2 Tashkent, 16.1.1987

Yakovlev Yak-40 společnosti Aeroflot se zřítil krátce po vzletu, který následoval pouhou jednu minutu a patnáct vteřin po vzletu Ilyushinu Il-76. Yak-40 se dostal do úplavu za větším letounem a přešel nekontrolovaně do ostrého pravého náklonu, narazil do země a okamžitě se vzňal. Všech 9 osob na palubě zahynulo [8].

4.3 V blízkosti letiště Johna Weyna, Santa Ana, Kalifornie, USA, 15.12.1993

Posádka IAI 1124A Westwind společnosti Martin Aviation na charterovém letu z La Verne, ztratila kontrolu nad strojem při vizuálním přiblížení v noci na letiště Santa Ana. Následkem čehož se letoun zřítil 3,5 NM severně od letiště, všech pět osob na palubě zahynulo. Příčinou ztráty kontroly nad letounem bylo vlétnutí do turbulence v úplavu Boeingu 757-200, který prováděl přiblížení před Westwindem. Boeing byl na přiblížení výše, proto klesal pod strmějším úhlem než Westwind, navíc požádal o snížení rychlosti na 150 uzlů, ale zpomalil pod tuto hodnotu. Westwind snížil rozstup z 3,5 NM na pouhé 2,1 NM. Jednalo se však o vizuální přiblížení a za rozstup zodpovídal pilot Westwindu, byť v noci to bylo obtížnější než ve dne, navíc řídicí letového provozu nebyl povinen ho upozornit, že se přibližuje ke zpomalujícímu Boeingu a taky tak neučinil. Během klesání v nadmořské výšce 1100 stop zasáhla Westwind silná turbulence z B757, stroj se náhle naklonil a začal rychle klesat až došlo k nárazu do země. Za hlavní příčinu nehody vyšetřovatelé označili neschopnost pilotů Westwindu dodržet bezpečný rozstup od vpředu letícího Boeingu, dále bylo zjištěno, že neměli žádný výcvik zaměřený na turbulenci v úplavu. Negativně situaci ovlivnily i nedostatečné postupy na letišti pro vizuální přiblížení a dodržení bezpečných rozstupů [9].

4.4 Nad Londýnem, Velká Británie, 5.9.1996

Boeing 737-500 British Midland se během vyčkávání střetl se silnou turbulencí způsobenou úplavem Boeingu 767 letícího 6 NM před ním [10].

4.5 Wellington, Nový Zéland, 3.3.1997

Cessna C-185 provozovaná soukromým vlastníkem, vzletla ze středové pozice vzletové a přistávací dráhy 16 wellingtonského mezinárodního letiště za Boeingem 727, který použil ke vzletu celou délku dráhy a stoupala přímo ve směru dráhy. Povolení ke vzletu Cessně bylo vydáno s ohledem na pilotovu žádost nedodržet doporučený rozstup kvůli turbulenci v úplavu, který stanoviště řízení letového provozu správně použilo. Když se letoun dostal do turbulence v úplavu Boeingu došlo ke ztrátě kontroly a pádu na zem, žádná ze dvou osob na palubě nebyla zraněna, ale letoun byl vážně poškozen [11].

4.6 Na letové trati, Santa Barbara, Kalifornie, USA, 2.9.1999

Boeing 737-300 United Airlines během letu ve FL240 zaznamenal silnou turbulenci způsobenou úplavem za letounem McDonnell Douglas MD-11 stoupajícím před B737 na podobné trati s minimálním rozstupem 1,5 minuty při prostoupávání jeho hladiny [12].

4.7 Švédsko, 20.9.1999

Saab JAS-39A Gripen se zřítil do jezera Vänern při nácviku vzdušného souboje. Po průletu úplavem za jiným strojem, Gripen náhle změnil směr a pilot dostal varování před blízkostí terénu té nejvyšší vážnosti. Katapultoval se z letounu a bezpečně přistál na padáku [8].

4.8 Na letové trati, Bristol, Velká Británie, 27.6.2000

Airbus A300-600 American Airlines na pravidelném letu z Heathrow, Londýn do JFK, New York, byl manuálně řízen při stoupání do FL220 během dne za VMC, posádka náhle uslyšela hlasitou ránu a souběžně s ní letadlo nekontrolovatelně zatočilo bez příslušného klonění. Posádka předpokládala poruchu směrového řízení, avšak po chvíli se letadlo chovalo normálně a reagovalo na zásahy řízení. Přesto se velitel rozhodl vrátit zpět na Heathow než riskovat transatlantický let s neznámou závadou. Během vyšetřování byly všechny součásti řízení letounu náležitě otestovány a nebyla nalezena žádná závada. Vzhledem k vzdálenosti jet streamů a jinak velmi klidné atmosféře toho dne, byla vyloučena možnost vlétnutí do turbulence v bezoblačném ovzduší. Na základě radarových dat se jako jediná reálná možnost jeví vlétnutí do úplavu za Boeingem 777, který proletěl místem incidentu o 4 minuty a 18 sekund dříve než Airbus. Díky stabilní atmosféře přetrvaly víry silné i po tak dlouhé době [13].

4.9 V blízkosti letiště JFK, New York, USA, 12.11.2001

Airbus A300-600 American Airlines číslo letu 587 se zřítil krátce po vzletu do čtvrti Belle Harbour v newyorském Queensu, po setkání s mírnou turbulencí v úplavu za Boeingem 747-400, který odlétal před ním. Zahynulo všech 251 cestujících, 9 členů posádky a 5 lidí na zemi. Vyšetřování se ujal Národní úřad pro bezpečnost v dopravě a čekal ho náročný úkol zjistit, proč se moderní dopravní letadlo zřítilo z oblohy bez zjevné příčiny [14,15].

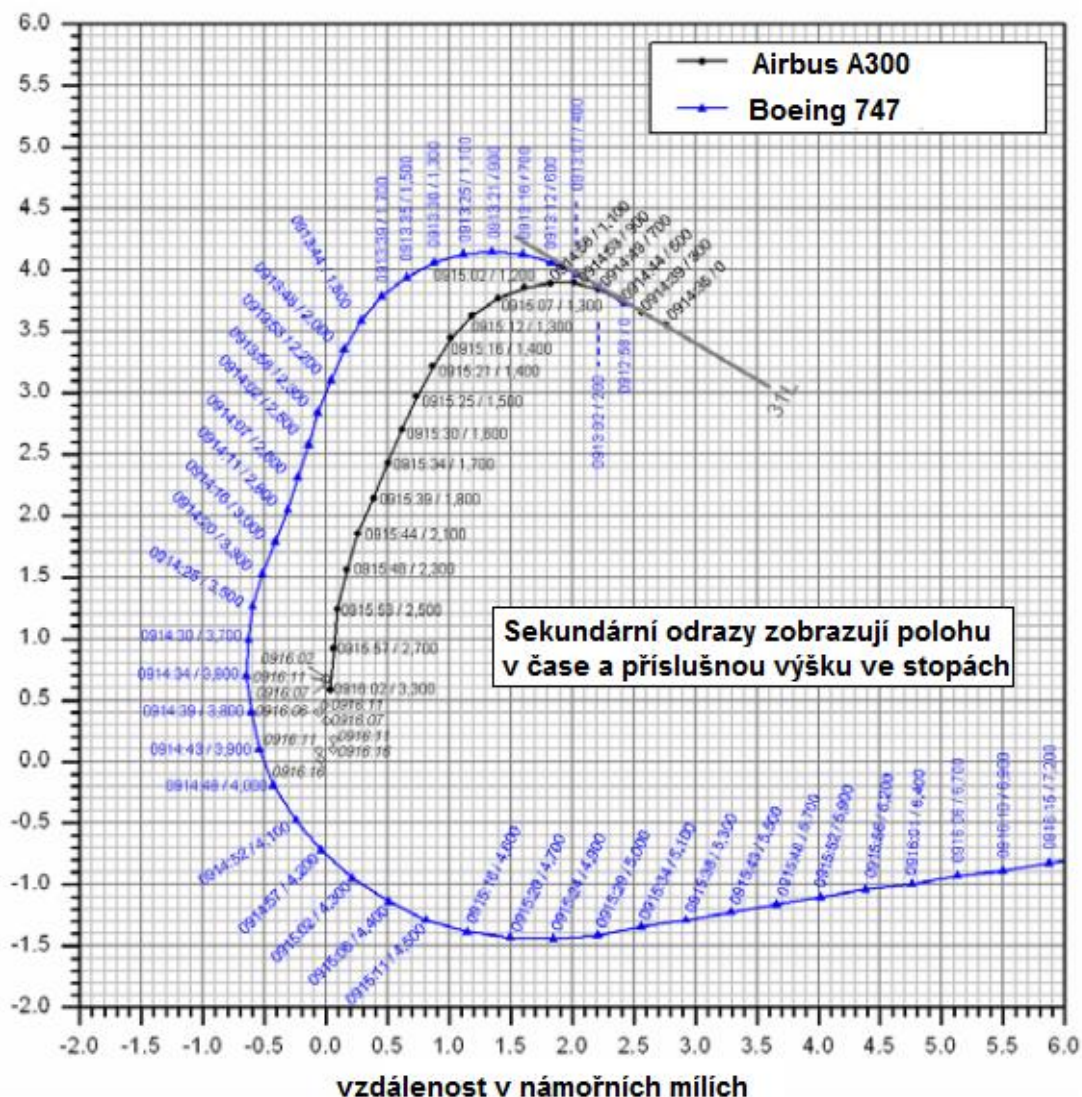
4.9.1 Počáteční teorie příčiny nehody

Jelikož se nehoda odehrála pouhé dva měsíce od teroristického útoku na Světové obchodní centrum v New Yorku a rozmístění trosk napovídalo tomu, že letoun narazil do země pod velkým úhlem, museli vyšetřovatelé vzít v úvahu, zdali se nejednalo o teroristický čin a zaměřili se na hledání stop výbušniny na troskách. Tomuto scénáři také nahrávala některá očitá svědectví, která vypovídala o výbuchu letadla ještě ve vzduchu. Bylo též důležité roztřídit a prozkoumat pouze trosky Airbusu, které byly promíchány se zbytky domů, na které se zřítil. Při zkoumání a katalogizaci trosk vyšetřovatelé zjistili skutečnost, že na místě havárie chybí ocasní kýlová plocha a směrové kormidlo, obě tyto části byly nalezeny v zálivu Jamaica Bay, několik kilometrů daleko, mezi místem nehody a letištěm, to mohlo znamenat jediné, že se kýlovka oddělila za letu. To mohlo vyloučit teroristický čin, protože odpálit výbušninou pouze svislou ocasní plochu by bylo velmi obtížné. Po vyhodnocení laboratorních testů na přítomnost zbytků výbušnin byla tato teorie potvrzena, na žádném z testovaných zbytků letadla nebyly nalezeny látky nasvědčující přítomnosti bomby [14].

Hned v prvním dnu vyšetřování byly nalezeny oba zapisovače letových údajů. A i záznam hlasového zapisovače nezachytil žádný výbuch, na základě čehož byla varianta protiprávního činu definitivně vyloučena. Proto muselo vyšetřování začít ubírat jiným směrem a to takovým, že jedno z nejpoužívanějších dopravních letadel světa té doby mohlo mít skrytou konstrukční vadu. Klíčové údaje mohly přijít ze zapisovače letových údajů. Ty ukázaly, detailní průběh celého letu, včetně všech důležitých změn letových parametrů. Významné byly též záznamy ze sekundárního radaru na letišti JFK, jelikož těsně před A300 vzlétal ze stejné dráhy Boeing 747 společnosti Japan Air a ze záznamníku hlasové komunikace v kokpitu je patrné, že druhý pilot, který byl v této fázi letu pilotem letícím, měl pochybnosti o dostatečném rozstupu od Jumbo Jetu před nimi [14].

Odrazy sekundárního radaru v grafu níže (obrázek 12) ukazují, že letouny po celou dobu letu udržovaly předepsaný bezpečný rozstup, který je podle předpisů FAA pro tyto kategorie letadel stanoven na minimálně 5 NM. Ten den však panovalo téměř bezvětří, které brání rozpadu vírů úplavu, proto vědci z NASA provedli výpočty síly turbulencí se kterými se A300 mohl střetnout a zdali mohli způsobit odtržení kýlové plochy. Ze záznamu CVR bylo zjištěno, že Airbus

turbulencí v úplavu skutečně proletěl. Podle výpočtů však byla natolik slabá, že nemohla ohrozit říditelnost stroje, natož způsobit odtržení svislé ocasní plochy [14].



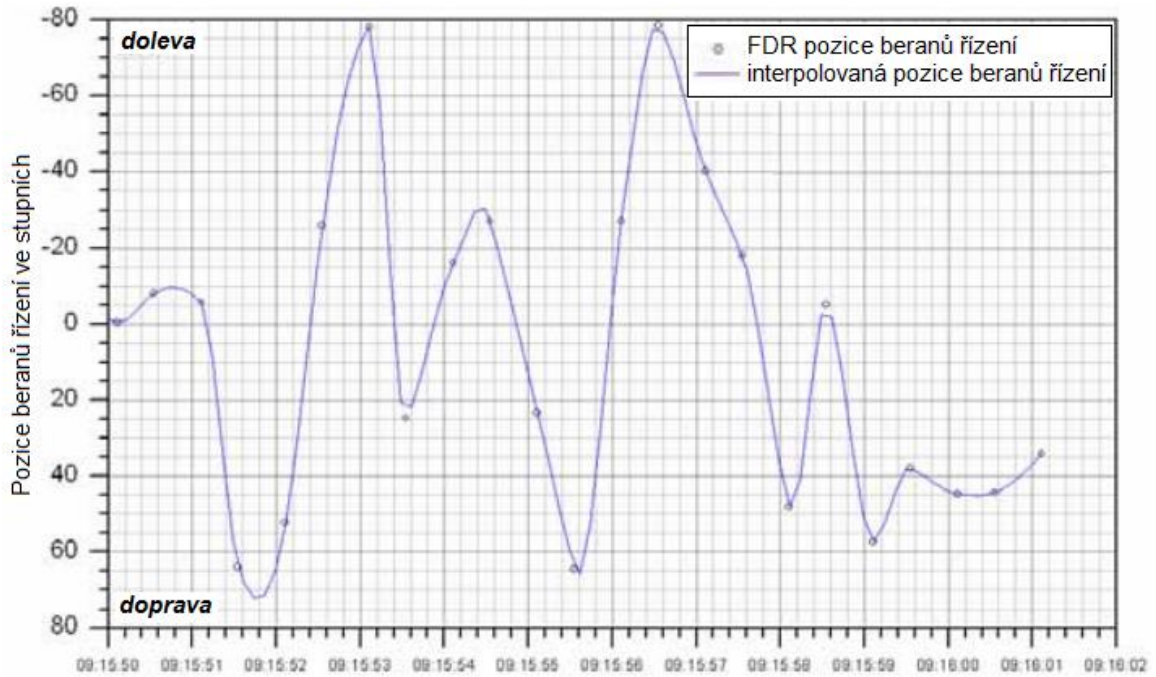
Obrázek 12 Polohy letounů A300 a B747 s příslušnými výškami ze sekundárního radaru letiště JFK [15]

4.9.2 Teorie mechanické závady

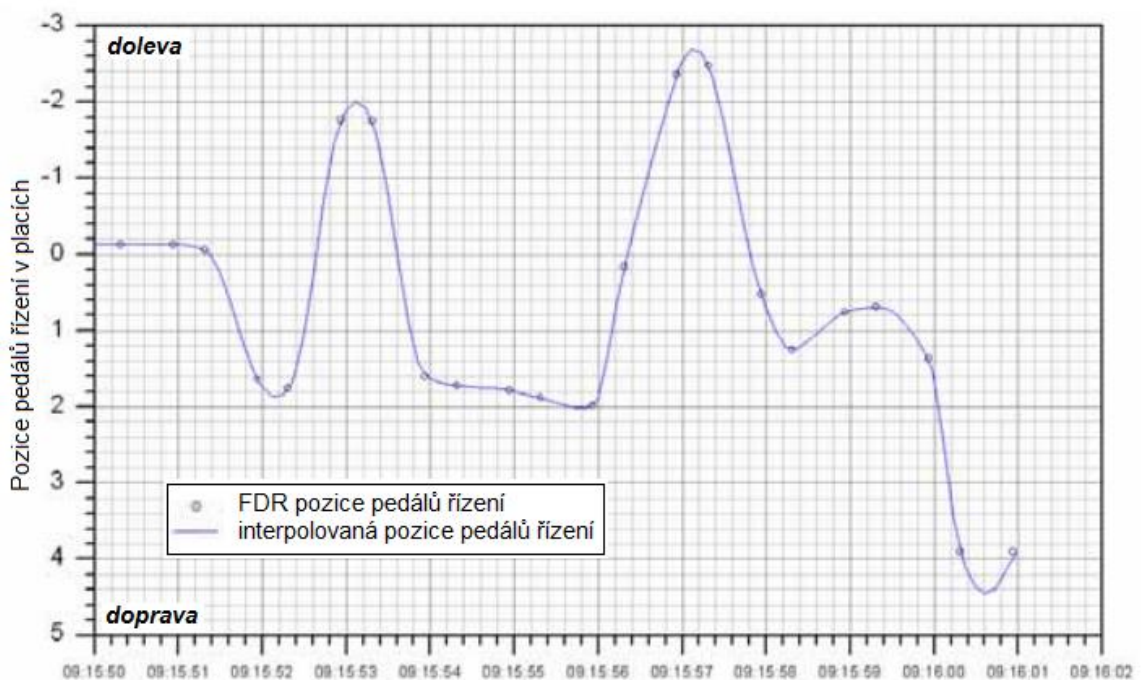
Jedinou možností, jak by mohl porыв ocasní plochu odlomit byla možnost, že měla konstrukční vadu. Celá kýlová plocha je vyrobená z kompozitu. Při zkoumání výrobní dokumentace havarovaného stroje našli vyšetřovatelé záznam z výstupní kontroly, která odhalila delaminaci kýlové plochy, to mohlo poukazovat na vadu materiálu, která by výrazně snížila jeho pevnost. Výrobce musel před předáním kýlovou plochu opravit. Důkladné zkoumání trosek však i tuto možnost oslabení pevnosti vyloučilo. Airbus A300 má tři páry závěsů upevňujících kýlovou plochu k trupu a na havarovaném stroji všechny praskly. Mohla být konstrukce zádi natolik poddimenzována, že nevydržela ne příliš silný porыв? Ve spolupráci s výrobcem byly závěsy

důkladně otestovány. Měly vydržet působící sílu 457 kN, při této hodnotě bezpečně odolaly, ve skutečnosti došlo k destrukci závěsů při hodnotě působící síly více než dvojnásobné. To znamenalo, že se kýlová plocha utrhlá při působení síly výrazně vyšší, než jaké by měl být A300 za letu normálně vystaven [14].

4.9.3 Odhalení skutečné příčiny nehody



Obrázek 13 Graf průběhu výchylek beranů řízení těsně před ztrátou kýlové plochy [15]



Obrázek 14 Graf průběhu výchylek pedálů řízení těsně před ztrátou kýlové plochy [15]

Ze záznamu palubních zapisovačů je patrné, že po vlétnutí do turbulence v úplavu druhý pilot výrazně vychyloval řídicí plochy včetně směrového kormidla. Mohlo přílišné vychýlení směrovky způsobit nárůst síly až za mez pevnosti závěsů? Airbus A300 je vybaven systémem omezení výchylky směrového kormidla při zvyšující se rychlosti, což by mělo tomuto riziku zamezit. Rozmezí výchylek se pohybuje od 30° do rychlosti 165 uzlů až po omezení na pouhé 3,5° při rychlostech nad 395 uzlů. Podle záznamu letových dat tento systém pracoval správně a v dané fázi letu výchylku omezil na 11°. Osamocená plná výchylka směrového kormidla tedy nemohla závěsy přetížít. Z letových dat, vyšlo najevo, že druhý pilot při snaze eliminovat turbulence v úplavu střídavě vychýlil směrové kormidlo do krajních poloh třikrát. Po vložení parametrů do výpočetního modelu, simulace ukázala, že s každou další výchylkou v opačném smyslu síla na kýlovce narůstala, až překročila mez pevnosti a závěsy se utrhly. Příčinou nehody byla přehnaná reakce pilota na turbulenci v úplavu [14, 15].

4.9.4 Nedostatky výcviku American Airlines

Proč k ní, ale došlo? Vyšetřovatelé vyslechli kolegy druhého pilota a dozvěděli se znepokojivou informaci. Na turbulenci v úplavu nereagoval takto agresivně poprvé. Když byl svými kolegy, kapitány dotazován, proč takto razantně zasahuje do řízení, odpověděl, že ho to tak naučili při výcviku. Vyšetřovatelé museli prověřit výcvikový program American Airlines, jestli pilotům vštěpoval takto nebezpečné návyky, dříve, než by se mohla tragédie zopakovat. Skutečně našli ve výcviku část ve, které se piloti učí vybírat nezvyklé polohy včetně nekontrolovatelného náklonu až 90°. Takový náklon však v dopravním letadle velmi pravděpodobně nikdy nezažijí. Scénář úlohy ve výcviku zněl, že pilot letí za letounem Boeing 747 a vlétne do jeho úplavu, letadlo začne nekontrolovatelně klopat nejprve mírně na jednu stranu a poté prudce na druhou až dosáhne náklonu 90°, teprve tehdy je pilot vyzván k obnovení kontroly nad řízením, což vyžaduje plné výchylky křidélek s koordinovanou výchylkou směrovky. Takovýto scénář je však při dodržení bezpečných rozstupů nereálný a takto velké letadlo i při střetu s turbulencí v úplavu reaguje normálně na vstupy do řízení a mírný náklon se dá bez obtíží vyrovnat. Naopak při příliš prudkých zásazích do řízení, díky setrvačnosti letadla vzniká dojem nekontrolovatelného klonění, které je však způsobeno předešlým vychýlením křidélek. Při střetu s úplavem již ve více nehodách přehnaná reakce posádky situaci zhoršila, v této však byla fatální [14].

4.9.5 Doporučení vyšetřovací komise

Na základě výsledků vyšetřování American Airlines změnili výcvikové osnovy a upravili simulace, aby odpovídaly reálným situacím. Piloti jsou upozorňováni, aby se vyvarovali příliš agresivních zásahů do směrového řízení ve vysokých rychlostech, zejména plné nebo téměř plné výchylky směrovky v jednom směru následované plnou nebo téměř plnou výchylkou

v opačném směru. Do kokpitu letounů A300 byla umístěna varovná kontrolka, varující před přílišným vychýlením směrového kormidla. Výrobci bylo doporučeno pro typy A300 a A310, aby zvýšil ochranu před potenciálně nebezpečnými vstupy do směrového řízení při vysokých rychlostech. Moderní dopravní letouny s řízením fly-by-wire a systémy ochrany letové obálky by již měly takovýmito nehodám zabránit, systém by měl automaticky omezit vstupy do řízení prováděné pilotem tak, aby nedošlo k poškození stroje ani ztrátě stability letu [15].

4.10 Na letové trati severovýchod Španělska, 28.5.2006

Airbus A320 Vueling Airlines narazil během traťového letu ve FL325 na náhlé turbulence. Během dočasné ztráty kontroly, letoun sklesal do FL310. Sedm cestujících utrpělo menší zranění a došlo k poškození kabiny pro cestující nezajištěným vozíkem občerstvení. Příčinou turbulence byl úplav za letounem Airbus A340-300 letícím 10 NM před A320 a o 500 stop výše. Vyšetřováním se však zjistilo, že reakce posádky byly neadekvátní a mohly přispět ke zhoršení následků nastalé situace [16].

4.11 Na letové trati poblíž Oroville, Washington, USA, 10.1.2008

Airbus A319 Air Canada se neočekávaně a náhle setkal s turbulence v úplavu za Boeingem 747-400 letícím téměř 11 NM před ním. Piloti reagovali potenciálně nebezpečnými vstupy do řízení, což vedlo k přechodu systému ochrany letové obálky do režimu Alternate Law a zhoršení chování letounu, náklonu až 55° a nechtěného klesání o 1400 stop. Během této situace probíhal v kabině cestujících servis a signalizace pro zapnutí bezpečnostních pásů byla vypnuta, při nekontrolovatelných pohybech letounu došlo k nárazu vozíků s občerstvením o strom kabiny a zranění několika cestujících, některých těžce [17].

4.12 Hurlburt Field, Florida, USA, 8.7.2008

Cvičný letoun Pilatus PC-12 amerického vojenského letectva se zřítil při pokusu o přistání příliš blízko za těžším letounem AC-130U, když vlétl do jeho turbulence v úplavu. Předpisy vojenského letectva doporučují rozstup minimálně 2 minuty od těžkých pomalu letících letounů jakým je i AC-130. Pilot Pilatusu však udržoval rozstup pouhých 40 vteřin. Po vlétnutí do úplavu AC-130 se PC-12 nekontrolovatelně přetočil na záda, pilot-instruktor se pokusil zastavit rotaci kolem podílné osy plnou výchylkou křidélek, než však stačil letoun vyrovnat, narazil levým křídlem do země. Letoun klouzal více než 200 m po travnaté části letiště, než se nakonec zastavil [8].

4.13 V blízkosti Sydney, Austrálie, 3.11.2008

Saab 340B společnosti Regional Express AL se chystal k zařazení na 7 NM konečného přiblížení na dráhu 34 pravá jeho cílového letiště v Sydney. Náhle se letoun stal dočasně neovladatelným a došlo k náklonu 52°doprava a ztrátě 400 stop výšky během 15 sekund po

vlétnutí do silné turbulence, přičemž došlo k drobnějším zraněním několika cestujících. Po prozkoumání radarových a meteorologických podkladů došel australský úřad pro bezpečnost v dopravě k závěru, že za incidentem stojí turbulence v úplavu za Airbusem 380, který prováděl paralelní přiblížení na dráhu 34 levá. Toho dne vanul vzhledem k trati přiblížení boční vítr z leva o rychlosti 35 uzlů, který zapříčinil snesení úplavových vírů od A380 přímo do letové trajektorie Saabu. Navíc zde nebyl žádný doporučený rozstup pro letouny provádějící paralelní přiblížení, potřebný zejména při silném bočním větru, který mohl incidentu předejít [18].

4.14 Humberside, Velká Británie, 26.9.2009

Soukromý Piper PA28-140 během přistání na dráhu 26 letiště Humberside, po přiblížení za podmínek pro let za viditelnosti, se během podrovnání náhle a nekontrolovatelně naklonil doprava s následným nárazem do země. Letoun se převrátil a vážně poškozený se zastavil vedle dráhy, naštěstí nedošlo k požáru. Pilot utrpěl vážná zranění. Během vyšetřování se ukázalo, že za nehodou pravděpodobně stojí turbulence v úplavu za vrtulníkem Sikorsky S76, který přelétnul práh stejné přistávací dráhy asi 1 NM před přistávajícím Piperem. Vyšetřovatelé poukázali na skutečnost, že víry úplavu vrtulníku stejné hmotnostní kategorie jsou silnější než u letadel s pevnými křídly, a to zejména při konečné deceleraci před přistáním a přechodem do visu. Na základě této události doporučili, aby byli piloti letadel s pevnými křídly letící za vrtulníky (i stejné kategorie turbulence v úplavu) upozorňováni na hrozící riziko při udržování nedostatečného rozstupu [19].

4.15 Poblíž Frankfurtu, SRN, 13.12.2011

Airbus A320 a A380-800, A320 byl povolen ke vzletu z dráhy 25C ve Frankfurtu s následným nalétnutím SID dále zatáčejícím doleva, těsně před dosednutím A380 na dráze 25L. A380 poté musel zahájit go-around z malé výšky a dostal se na paralelní trať před odlétající A320 s minimálním rozstupem 1NM horizontálně a 200 stop vertikálně od tohoto letounu. Přičemž minimální rozstup v dané situaci mezi těmito letouny je stanoven na 7 NM horizontálně nebo 1000 stop vertikálně. Vyšetřování sice prokázalo, že nedošlo ke střetu s úplavem za A380, ale systémové řízení rizik řízení letového provozu bylo neadekvátní [20].

4.16 Braunschweig, SRN, 9.9.2012

Robin DR 400 vzlétl v 17:08 místního času z travnaté dráhy za dvouplošníkem Antonov An-2, po vzletu v malé výšce se náhle naklonil doprava, až k náklonu 90° a narazil do země v blízkosti letiště. Všechny tři osoby na palubě DR 400 zahynuly.

Vyšetřování této nehody se ujal německý federální úřad pro vyšetřování leteckých nehod za podpory německého centra pro letectví a kosmonautiku a institutu letadlových systémů. Hlavní výhodou této spolupráce bylo podrobné prověření a analýza možnosti, že DR 400 vlétl do

turbulence v úplavu za An-2. Nejprve byly analyzovány víry úplavu An-2 a v návaznosti na to, možný efekt při střetu s DR 400 [21].



Obrázek 15 DR 400 těsně před střetem se zemí s plně vychýleným křídélky pro vyrovnání náklonu [21]

4.16.1 Obecné informace

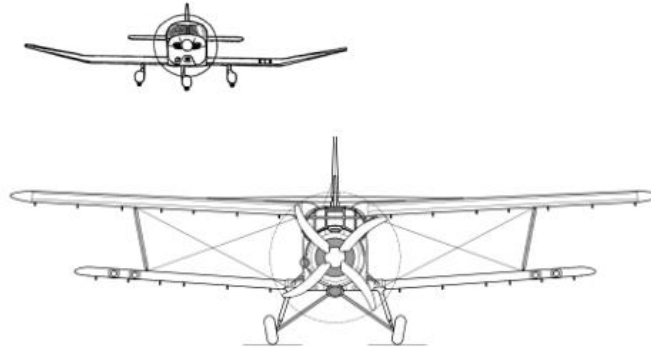
Nadmořská výška letiště v Braunschweigu, na kterém k nehodě došlo, je 294 m nad mořem. Délka travnaté dráhy je přibližně 500 m. Jednalo se o horký letní den s meteorologickými podmínkami pro let za viditelnosti a s téměř žádným větrem. Vzhledem k povaze zúčastněných letadel nebyly k dispozici žádná data z letových zapisovačů. Na základě dostupného fotografického materiálu se předpokládá, že dvě letadla vzlétla 20 až 60 sekund po sobě, nejpravděpodobněji v čase okolo 40 sekund [21].

4.16.2 Parametry zúčastněných letadel

Obě zúčastněná letadla spadají podle ICAO do kategorie turbulence v úplavu LIGHT. Robin DR 400 je jednomotorový, čtyřmístný sportovní letoun dřevěné konstrukce. Antonov An-2 je jednomotorový, celokovový dvuplošník používaný zejména pro zemědělské účely a vysazování parašutistů [21].

Tabulka 7 Základní parametry zúčastněných letadel [21]

| typ letadla | DR 400/180 R | An-2 |
|-----------------------------|--------------|-------------------------------------|
| maximální vzletová hmotnost | 1 000 kg | 5 500 kg |
| rozpětí křídel | 8,72 m | 18,18 m (horní) 14,24 m (spodní) |
| stoupací rychlost | 130 km/h | 120 km/h |



Obrázek 16 Čelní pohled na letouny DR 400 (výše) a An-2 (níže), přibližně v měřítku [21]

4.16.3 Primární cirkulace

Pro určení intenzity cirkulace indukovaných víru dvouplošníku An-2 se vycházelo z předpokladu, že indukované víry konců křídel se sloučí poměrně rychle pokud vzdálenost mezi křídly není příliš velká. Proto je cirkulace určena stejným postupem jako pro letadlo s jedinou nosnou plochou. Podle Kutta-Joukowského teorému je primární cirkulace funkcí vztlaku L_L a pravé vzdušné rychlosti V_L vedoucího letadla a hustoty vzduchu ρ .

$$\Gamma_0 = \frac{L_L}{\rho V_L b'}$$

Vzdálenost mezi dvěma víry b' je určena rozpětím křídel vedoucího letadla b_L .

$$b' = b_L \frac{\pi}{4}$$

Pro výpočet primární cirkulace byla hmotnost An-2 použita jako maximální vzletová, což je nejhorší případ pro vytvoření nejsilnější cirkulace. Vztlak se předpokládá rovný tíze letadla v počáteční fázi rozletu. Rychlost počátečního stoupaní je 120 km/h. Pro nadmořskou výšku daného letiště (přibližně 300 m n. m.) je hustota vzduchu, z definice mezinárodní standardní atmosféry, $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$.

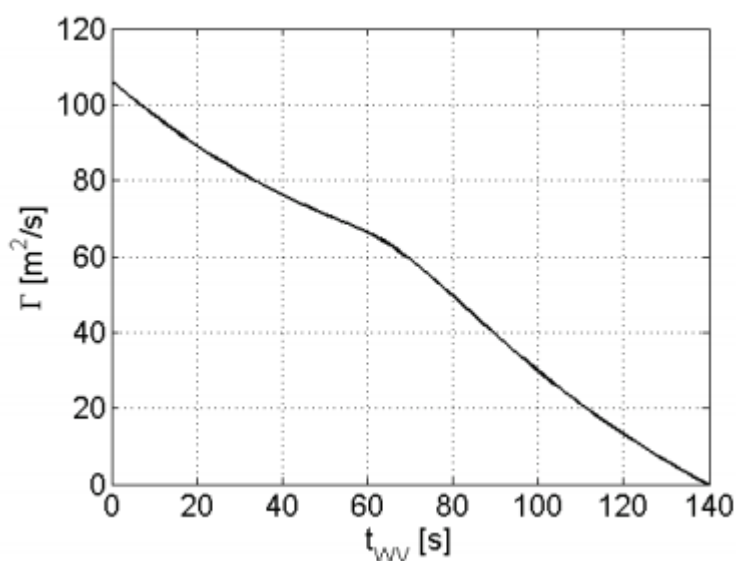
S těmito vstupy byla určena primární cirkulace za An-2 $\Gamma_0 = 106 \text{ m}^2/\text{s}$. Tato hodnota je asi trojnásobná v porovnání s cirkulací za DR 400 při stejných podmínkách. Je třeba poznamenat,

že rychlost letu An-2 v této počáteční fázi je poměrně malá na letadlo této velikosti. To je dáno především konfigurací s dvěma křídly a velkou plochou křídel. Vzhledem k relativně malé rychlosti je cirkulace poměrně velká na letadlo této velikosti [21].

4.16.4 Chování úplavu a jeho rozpad

Obecně víry úplavu klesají díky jejich sebou vytvářenému sestupnému proudu. Kvůli přízemnímu efektu je minimální výška vírů určena jako 50 % vzdálenosti b' mezi dvěma víry, což přibližně odpovídá polovině rozpětí křídel. Vzdálenost vírů úplavu An-2 byla předpokládána $b' = 12,7$ m. V případě vyšetřování této nehody nehrál přízemní efekt významnou roli.

Pro vyšetřování bylo důležité určit rozpad úplavu na základě parametrů primární cirkulace. Ověřený DRL model pro výpočet vývoje turbulence v úplavu P2P/ D2P předpověděl sílu a pozici vírů. V tomto případě byla určena pouze síla pomocí D2P vzhledem k meteorologickým záznamům toho dne – klidné atmosféře bez turbulencí (což je ten nejhorší scénář napomáhající pomalému rozpadu indukovaných vírů). Z toho vyplývá předpokládaná síla Γ vírů v daném čase t_{wv} . Významná je síla vírů v okamžiku střetu s DR 400 v čase okolo 40 sekund, cirkulace má stále značnou sílu v daných podmínkách [21].



Obrázek 17 Rozpad víru úplavu An-2 bez atmosférické turbulence (model D2P) [21]

4.16.5 Postup (pohyb) vírů úplavu

Laterální pohyb úplavu je ovlivněn zejména větrem. V tomto případě byl považován efekt větru za zanedbatelný vzhledem k panujícím meteorologickým podmínkám. Proto se nepředpokládá žádný laterální pohyb vírů.

Jak již bylo zmíněno výše, principiální efekt na klesání úplavu w_{WV} má sestupný proud vytvářený samotnými indukovanými víry. Ten přímo závisí na tangenciální rychlosti vírů V_{WV} , která je funkcí okamžité síly víru.

$$V_{WV,pot} = \frac{\Gamma(t)}{2\pi r}$$

Vzdálenost dvou vírů $r = b^2$

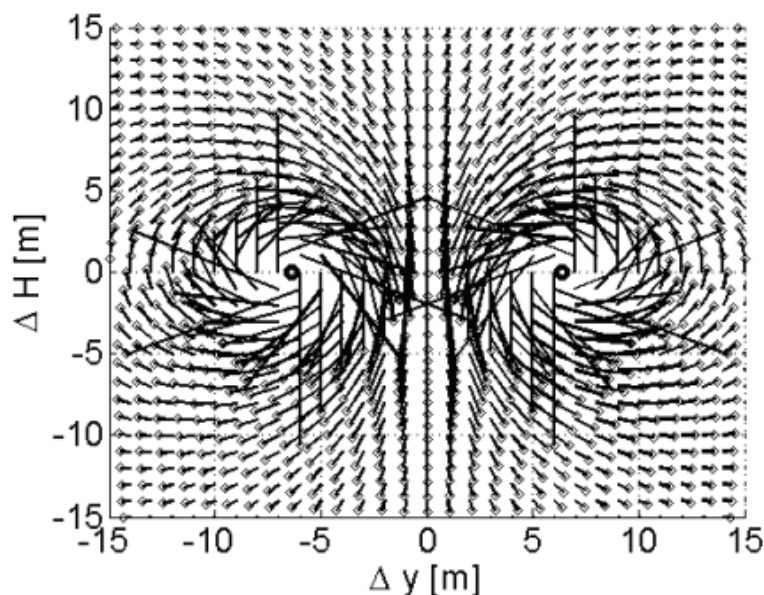
$$w_{WV} = \frac{2\Gamma(t)}{\pi^2 b_L}$$

Pro víry v čase potenciálního střetu $t = 40$ s se předpokládá vzdálenost sklesání vírů na 40 až 50 m [21].

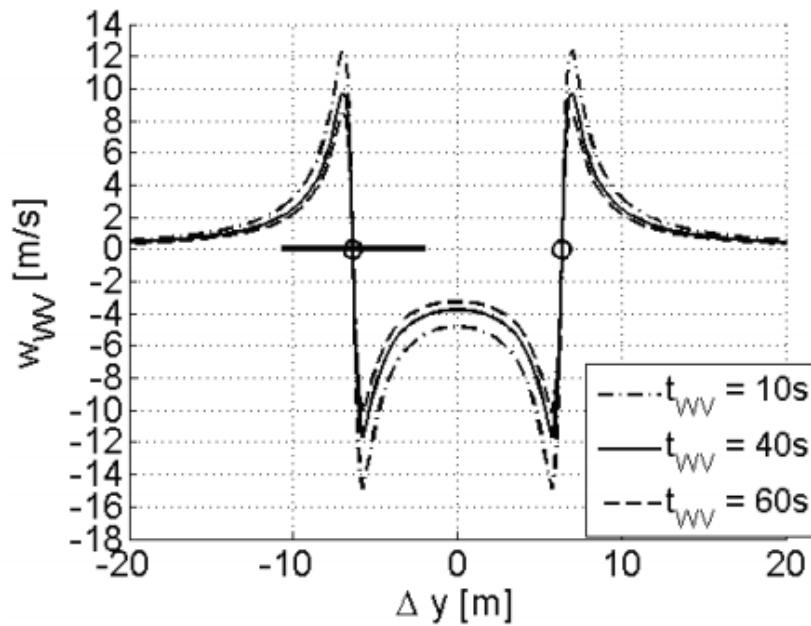
4.16.6 Proudové pole

Jednotlivé vektory rychlosti v proudovém poli indukovaných vírů se spočítají překrytím obou jednotlivých vírů s opačným smyslem cirkulace pomocí Burnham-Hallocockova modelu použitím analytické tangenciální rychlosti ($V_{WV,BH}$).

$$V_{WV,BH} = \frac{\Gamma(t)}{2\pi} \frac{r}{r_c^2 + r^2}$$

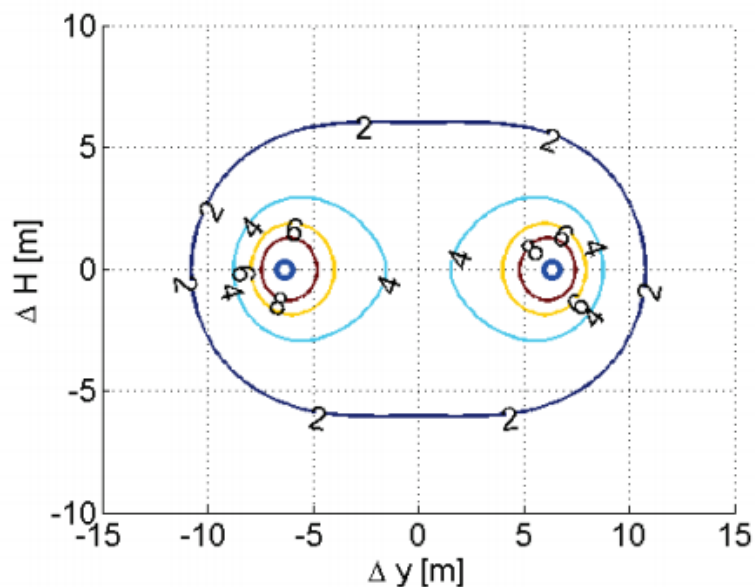


Obrázek 18 Rozmístění vektorů rychlosti ve víru úplavu An-2 v čase t ($t = 40$ s, $\Gamma = 76$ m²/s) [21]



Obrázek 19 Laterální rozmístění vertikální složky rychlosti vírů úplavu, pro pozice ve středu vírů (rozpětí křidel DR 400 je umístěno do středu levého víru, zobrazeno v měřítku) [21]

Výsledky výpočetních modelů ukazují, že v první minutě života vírů úplavu An-2 mohla rychlost proudění ve vírech překračovat hodnotu 10 m/s v uvažovaných podmínkách. Význačné vektory rychlostí se nacházejí v prostoru dvojnásobku rozpětí křidel An-2 laterálně a jednonásobku vertikálně [21].



Obrázek 20 Rychlosti vírů úplavu v čase t ($t = 40$ s, $\Gamma = 76$ m²/s) v m/s na svislém řezu kolmém k osám vírů [21]

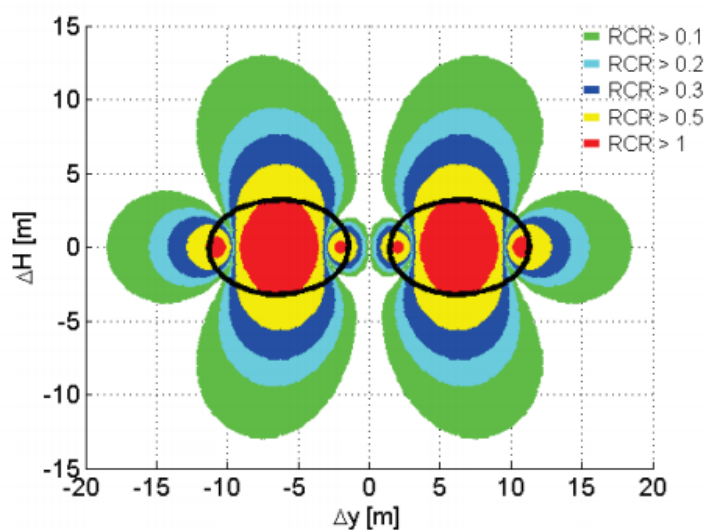
4.16.7 Reakce letounu na turbulenci v úplavu

Pro určení celkového silové a momentové působení vírů úplavu na letadlo může být použita metoda pruhů, kdy jsou nosné plochy letadla rozděleny na jednotlivé části-pruhy pro, které je určeno působení indukovaných vírů na každou z nich samostatně. Tato metoda byla v průběhu vyšetřování ověřena testy ve větrném tunelu i letovými zkouškami.

Pro případ střetu s turbulencí v úplavu je u této nehody nejdůležitější vliv klonivého momentu na letadlo s předpokládanou trajektorií letu paralelní s osami vírů. Toto může být dobře zjištěno pomocí metody pruhů. Přídavný místní úhel náběhu způsobený víry je určen v 25 % těživy každého pruhu. Poté je vypočten přídavný vztlak pro každý pruh a určená celková distribuce vztlaku podél rozpětí. Celkový klonivý moment je určen jako součet z hodnot vztlaku jednotlivých pruhů násobených délkou příslušných ramen od osy otáčení. Pro posouzení závažnosti potenciálního zásahu turbulencí v úplavu se používá závislost klonivého momentu letadla v úplavu $C_{l,WV}$ a jeho říditelnosti, respektive klonění při maximální výchylce křidélek. Z toho vyplývá bezrozměrná veličina RCR (roll control ratio) – poměr klonění a říditelnosti. Pro maximální výchylku křidélek DR 400 je hodnota $C_l(\delta_{a,max}) = -0,1$ [21].

$$RCR = \left| \frac{C_{l,WV}}{C_l(\delta_{a,max})} \right|$$

Na grafu níže (obrázek 21) je barevně vyvedeno RCR DR 400 letícího za An-2 ve vertikálním řezu kolmém na osy vírů úplavu An-2. Výsledky ukazují možný efekt na zasažené letadlo v daných podmínkách, pro bližší analýzu je prostor ve, kterém je RCR větší než 100 % vyznačen tučnou elipsou. Uvnitř těchto elips již není možné ani plnou výchylkou křidélek DR 400 kompenzovat klonivý moment způsobený víry úplavu An-2.



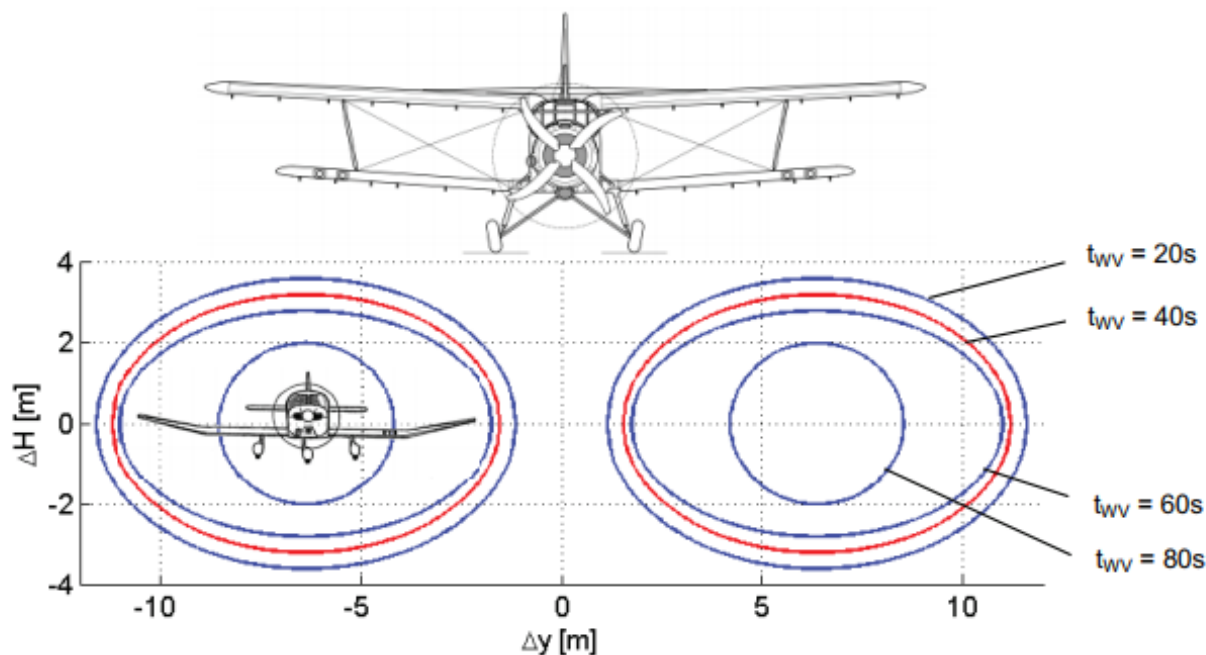
Obrázek 21 Rozmístění hodnot RCR pro DR 400 za An-2 v čase t ($t = 40$ s, $\Gamma = 76$ m²/s) [21]

Nález oblastí s hodnotou RCR 1 a větší v první minutě života vírů úplavu za An-2 v daných podmínkách prokazuje velmi závažný efekt při v létnutí DR 400 do těchto oblastí. Rozměr těchto oblastí odpovídá přibližně dvojnásobku rozpětí DR 400 horizontálně a rozměru rozpětí křídel vertikálně [21].

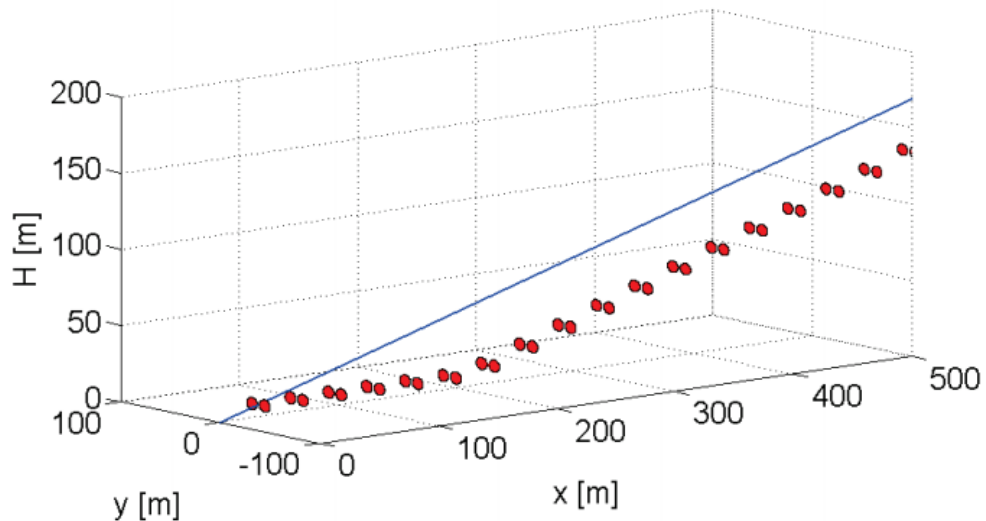
4.16.8 Celkový průběh nehody

Pro předpokládaný scénář průběhu nehody byla použita trajektorie An-2 s úhlem roviny počátečního stoupání $\gamma = 14^\circ$. Rozpad a sestup úplavu je byl použit z výpočetních modelů, jak je popsáno v předchozích pasážích. Byly vyznačeny elipsy se 100 % hodnotou RCR se závažnými následky na DR 400 z předchozího textu.

Graf níže zobrazuje situaci v čase $t = 46$ s po vzletu An-2 jako potenciální čas střetu DR 400 s úplavem. Z výsledků celkové simulace průběhu nehody vyplývá síla vírů, jejich rozpad a pohyb a závažnost střetu s DR 400. Z těchto parametrů je patrné, že střet DR 400 s úplavem za An-2 velmi pravděpodobně nastal a se závažným dopadem na říditelnost tohoto letounu kolem podélné osy [21].



Obrázek 22 Oblasti s hodnotami RCR větší než 100 % pro DR 400 za An-2 pro jednotlivé časy t (20 s, 40 s (červeně), 60 s, 80 s, klesání vírů není bráno v úvahu, oba letouny přibližně v měřítku) [21]



Obrázek 23 Celkový průběh vzletu An-2 (trajektorie modře) s červeně vyznačenými elipsami s RCR větším než 100 % pro DR 400 [21]

4.16.9 Ověřovací letové zkoušky

Pro ověření správnosti byly provedeny letové zkoušky v červenci 2014 s letouny An-2 a DR 400 na letišti Reinsdorf v SRN. Nejdříve bylo ověřeno chování vírů úplavu v přízemním efektu pomocí jejich zviditelnění generátory kouře umístěných na letišti. Kouřem následně prolétl v malé výšce letoun An-2. Testy byly provedeny před soumrakem v klidném ovzduší bez turbulencí a větru. Po vzletu An-2 a následném prolétnutí kouřem bylo pozorováno vytvoření dvou oddělených vírů rotujících vysokou rychlostí po dobu téměř 60 s, poté se rozpadly vlivem přízemního efektu. Tento přesvědčivý výsledek potvrdil vypočtený model rozpadu vírů úplavu v klidné atmosféře.



Obrázek 24 Pohled z křídla DR 400 na maximální úhel náklonu (110°) při vlétnutí do úplavu za An-2 [21]

Pro ověření správnosti výpočtu chování letounu DR 400 při zasažení úplavem An-2 byly provedeny letové zkoušky s těmito letouny, kdy DR 400 vlétl v bezpečné výšce 1000 m do úplavu za letounem An-2. Vír za levým koncem křídla An-2 byl zviditelněn pomocí generátoru kouře a byl viditelný na vzdálenost více než 1000 m za letounem. Bylo provedeno několik vlétnutí do tohoto víru s výrazným dopadem na klonění DR 4000. Úhel naklonění se pohyboval okolo 90° s maximální dosaženou hodnotou 110° za méně než 2 sekundy od střetu. Testy byly prováděny jak s řídicí pákou v neutrální poloze, tak s výchylkou proti smyslu rotace. Během vybírání těchto letových poloh byla pozorována ztráta výšky více než 50 m.

Výsledky těchto letových testů jasně prokázaly správnost výpočtu síly úplavu An-2 a jeho chování v klidném ovzduší a také poukázaly na nebezpečí tohoto jevu pro menší letadla všeobecného letectví [21].

4.16.10 Závěr vyšetřování

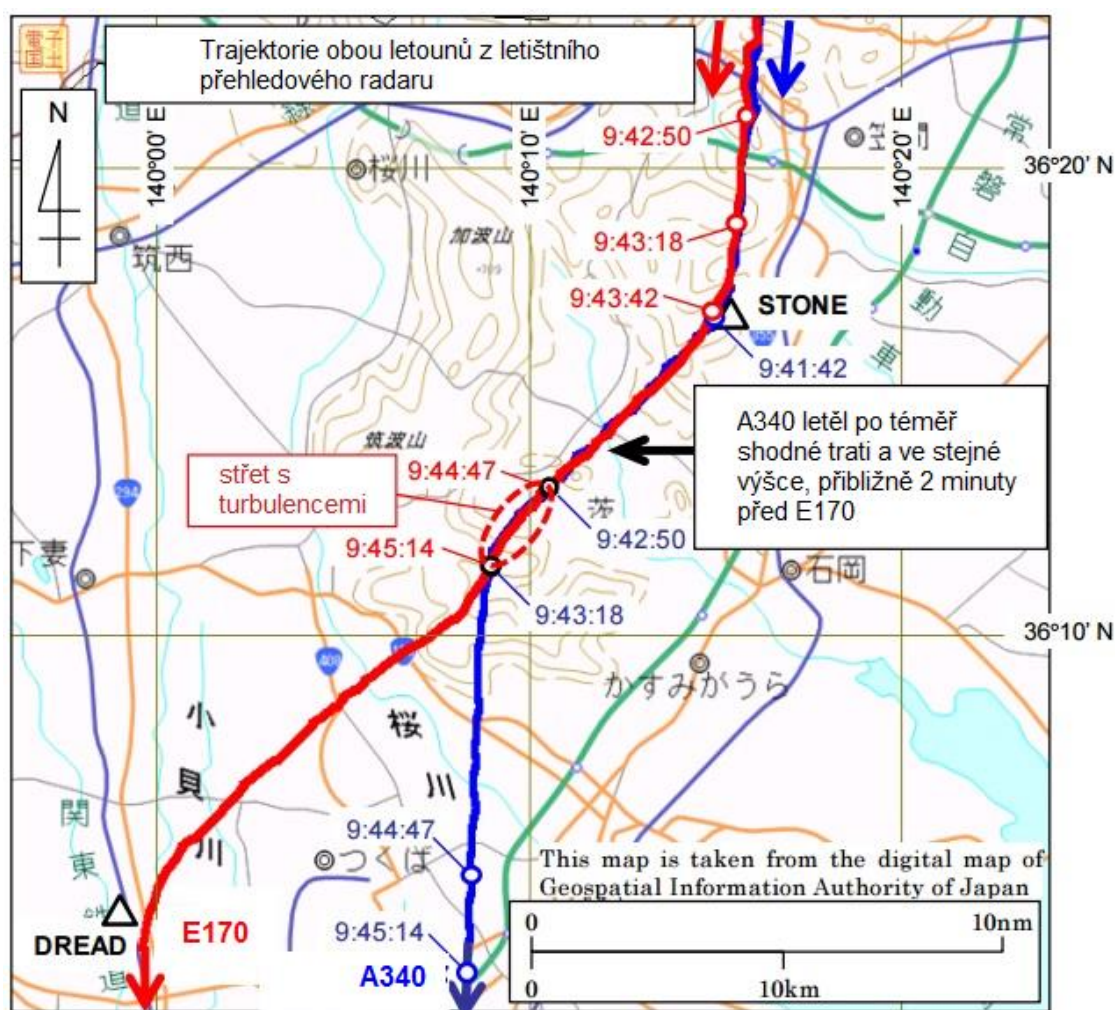
Letecká nehoda zahrnující dvě letadla všeobecného letectví spadající do kategorie turbulence v úplavu LIGHT byla analyzována se zvláštním důrazem na vliv právě turbulence v úplavu. Analýzy ukázaly, že turbulence v úplavu letounu An-2 byla hlavním důvodem nehody DR 400 krátce po vzletu, tyto výsledky byly ověřeny letovými zkouškami. Bylo prokázáno, že úplav za letounem An-2 (maximální vzletová hmotnost 5,5 t) může velmi závažným způsobem ovlivnit říditelnost menších letadel, a to až do času jedné minuty po vzletu tohoto stroje za klidného ovzduší. To je dáno zejména dvouplošnou konfigurací letounu An-2 a jeho poměrně nízkou stoupací rychlostí vzhledem k jeho velikosti. Největší síla víru, a tudíž i největší moment působící na letadlo prolétávající vírem se nachází v jeho středu [21].

Na základě této nehody by bylo žádoucí zvyšovat povědomí o problematice turbulence v úplavu i u pilotů všeobecného letectví, kteří se pohybují zejména na neřízených letištích s provozem lehkých letadel. Také dispečerů služeb AFIS a RADIO by měli být seznámeni s možnými účinky úplavu za letadly An-2 a jim podobnými typy, blížící se maximální vzletovou hmotností kategorii MEDIUM. Podávat důsledně informace o provozu takových letounů a v nutných případech doporučit rozstup od tohoto provozu, zejména v klidném ovzduší. Vzhledem k oblíbenosti používání An-2 pro výsadkové účely na neřízených letištích, je riziko opakování podobné nehody bez náležité prevence poměrně vysoké.

4.17 Na letové trati, Ishioka, Japonsko, 29.4.2014

Embraer 170 J-Air spadající pod společnost Japan Air Lines se na svém pravidelném letu JAL 1252 z Jamagaty do Tokya na letiště Haneda střetl s neočekávanou, silnou turbulencí během sestupu na cílové letiště. Obě palubní průvodčí byly zraněny během několika propadů letounu, z toho jedna těžce, žádný z 35 cestujících neutrpěl zranění. Zbytek letu proběhl bez dalších

mimořádných událostí. Během vyšetřování incidentu se jako nejpravděpodobnější příčina jeví vzlétnutí do turbulence v úplavu za Airbusem A340-600 který letěl v té chvíli ve stejné výšce a byl také vektorován na přiblížení na letiště v Tokyu, přes dodržení předepsaného rozstupu pro radarové vektorování 5 NM, vzlétl Embraer do turbulence za A340 pravděpodobně z důvodu stabilního ovzduší se slabým větrem, které toho dne panovalo a prodloužilo tak čas rozpadu turbulencí v úplavu [22].



Obrázek 25 Trajektorie zúčastněných letounů zobrazené na mapě [22]

4.18 Na letové trati nad Arabským mořem, 7.1.2017

Bombardier Challenger 604 prolétl turbulencí v úplavu za Airbusem A380 letícím o 1000 stop výše. Následkem čehož se nekontrolovatelně třikrát otočil kolem podélné osy a propadl se o 10 000 stop. Několik cestujících bylo zraněno z toho jeden těžce. Během incidentu letoun překročil maximální povolený násobek zatížení a vzhledem k možným poškozením draku musel být vyřazen z provozu [8].

5 Předcházení vzniku incidentů a nehod spojených s turbulencemi v úplavu

5.1 Obecná doporučení pro piloty všeobecného letectví

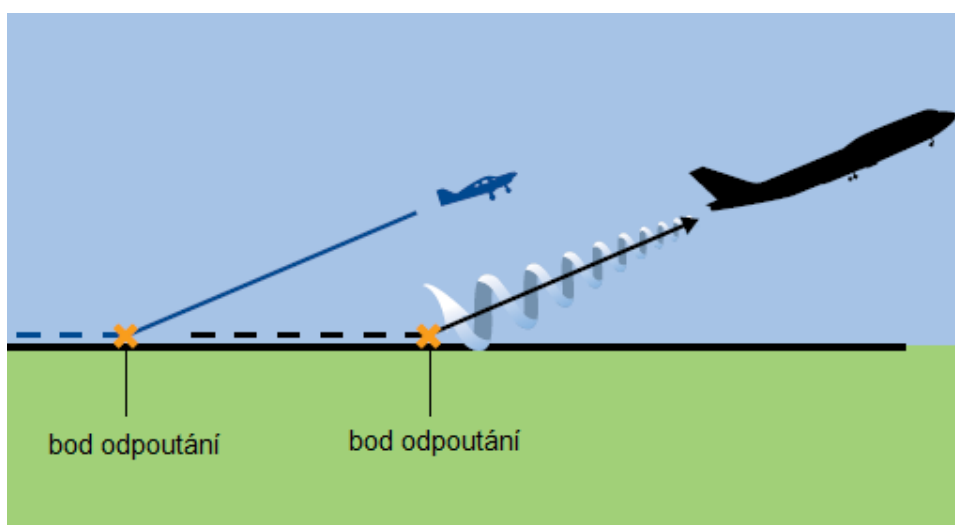
Piloti by si měli pamatovat tři základní doporučení spojená s nebezpečím turbulence v úplavu:

- a) Nedostat se příliš blízko k letadlu letícímu před nimi
- b) Nedostat se pod trajektorii letadla letícího před nimi
- c) Dbát zvýšené opatrnosti v podmínkách slabého větru nebo bezvětří

Základním předpokladem je samozřejmě dodržovat předepsané minimální rozstupy pro danou kategorii, ale také při provozu za VFR a na neřízených letištích používat zdravý rozum a uvědomovat si různé aspekty spojené s turbulencí v úplavu popsané v předchozích kapitolách [3].

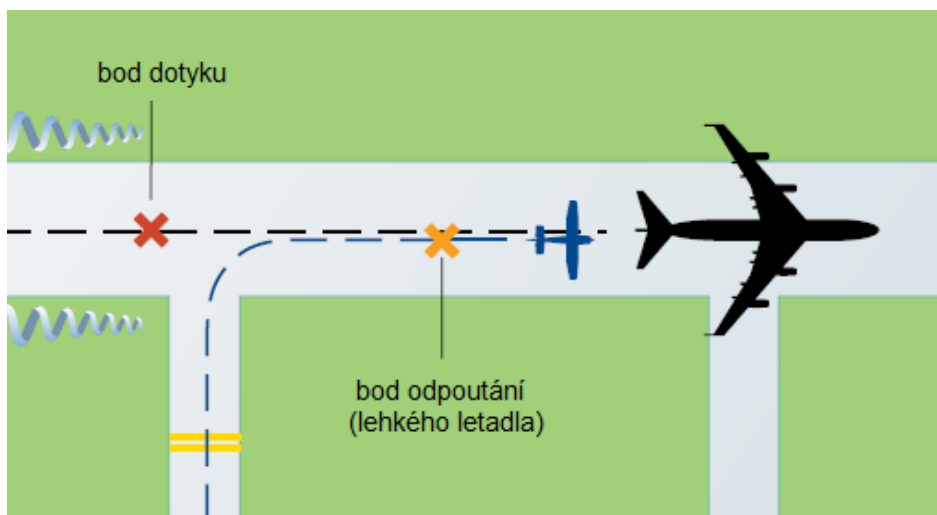
5.1.1 Vzlet

Silná turbulence v úplavu vzniká za vzlétajícím letadlem od bodu odpoutání a během stoupaní malou rychlostí na velkém úhlu náběhu. Je také přítomna za přistávající letadle až do bodu dotyku se zemí.



Obrázek 26 Vzlet za větším letadlem [3]

Během vzletu plánujte odpoutání před bodem odpoutání předcházejícího většího stroje. A při vzletu za přistávajícím těžším letounem plánujte odpoutání až za bodem jeho dosednutí. Pokud toto nejste schopni dodržet použijte příslušný rozstup viz kapitola 3 [3].

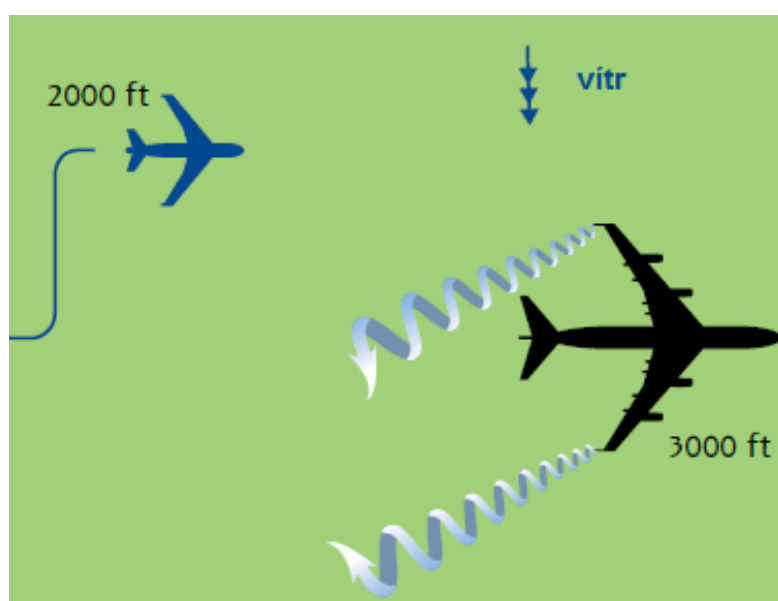


Obrázek 27 Vzlet po přistání většího letadla [3]

V případě slabého větru nebo bezvětří, pokud lehké letadlo (MTOW menší než 2 t) vzlétá za větším letadlem stejné kategorie LIGHT (MTOW 4-7 t), doporučuje se použít rozstupů jako by se již jednalo o kategorii MEDIUM. Je důležité nebát se požádat stanoviště řízení letového provozu o zvětšení rozstupu, pokud dojdeme k závěru, že je to potřeba pro bezpečné provedení letu [3].

5.1.2 Stoupání

Pokud po vzletu nemůžete stoupat mimo trajektorii letu předcházejícího stroje, zatočte z prodloužené osy dráhy co nejdříve. Pokud se nemůžete výrazněji odchýlit od trati před-vámi letícího letounu, zatočte mírně proti větru a sledujte paralelní trať k trati letěné tímto letounem [3].



Obrázek 28 Sledování paralelní trati během stoupání [3]

5.1.3 Křižování

Zamezte křižování trajektorií letu, za a pod úrovní jiného letadla. Pokud musíte jeho trajektorii křižovat za ním, provedte to ve výšce větší, než je výška jeho letu, v případě, že to není možné a dovoluje to minimální bezpečná výška nad terénem provedte křižování o nejméně 1 000 stop níže [3].

5.1.4 Následování

Zůstaňte buď nad úrovní letu vedoucího letadla, nebo pokud to situace neumožňuje použijte jednu z výše uvedených metod. Letět po paralelní trati mírně proti větru, nebo pokud to dovolí terén, letět o nejméně 1 000 stop níže přímo za vedoucím letadlem [3].

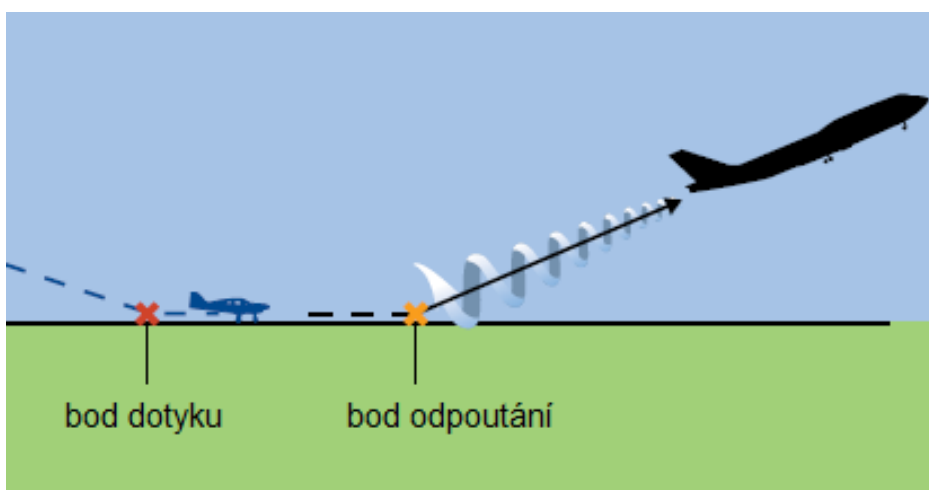
5.1.5 Míjení na vstřicím kurzu

Pokud se k vám na vstřicím kurzu blíží těžší letoun a letí o méně než 1 000 stop výše, provedte mírné vybočení proti větru k zamezení střetu s jeho turbulencí v úplavu [3].

5.1.6 Přiblížení

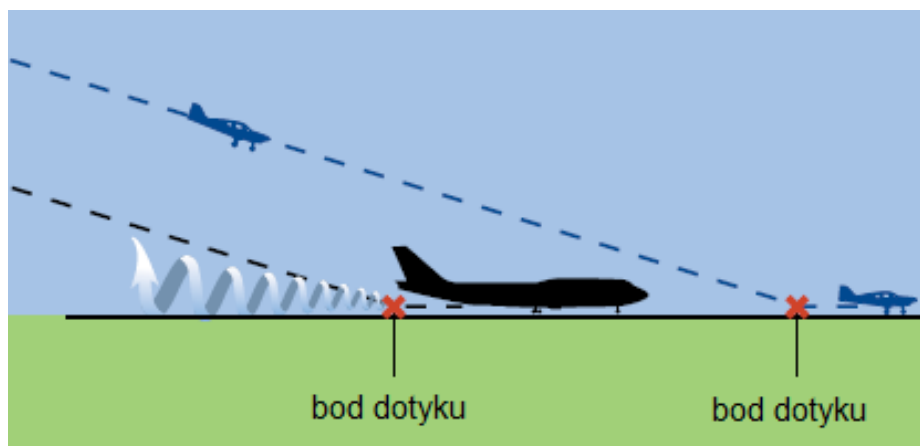
Většina nehod spojených s turbulencí v úplavu se stane při meteorologických podmínkách pro let za viditelnosti. Dobře zvažte možnost vizuálního přiblížení blízko za těžším letounem, protože v tokovém případě je pilot odpovědný za dodržování vlastního bezpečného rozstupu. Pokud provádíte vizuální přiblížení nepředpokládejte, že letadlo, které následujete letí stejnou nebo nižší sestupovou trať. Pokud je to proveditelné, držte se dále od osy kurzového majáku, těžší letoun ji pravděpodobně sleduje. Lette po paralelní trati proti větru od této osy. VFR piloti pomalejších lehkých letadel by měli dbát zvýšené opatrnosti na turbulenci v úplavu při přistání na frekventovaných letištích s provozem těžších letadel [3].

5.1.7 Přistání



Obrázek 29 Přistání po vzletu těžšího letadla [3]

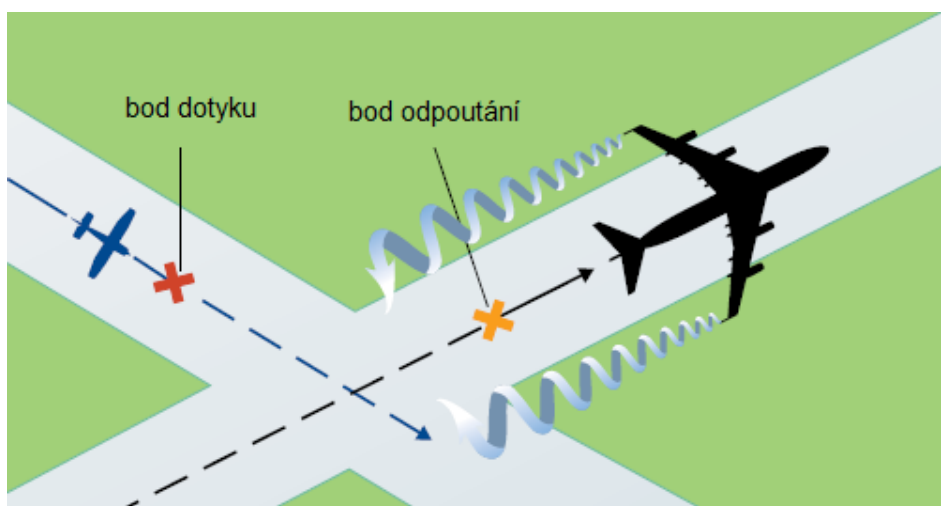
Rozpočet na přistání plánujte tak, abyste byli na zemi před bodem odpoutání vzletajícího stroje. V případě, že přistáváte za jiným letadlem, zůstaňte nad jeho sestupovou rovinou a pokud je to možné dosedněte až za úroveň jeho bodu dotyku. Výzkumy ukázaly, že víry úplavu v přízemním efektu se nemusí ve všech případech posouvat horizontálně od osy dráhy, ale mohou odskočit od země do výšky dvojnásobku rozpětí křídel letadla. Berte v úvahu tuto možnost, když přelétáváte bod dotyku předcházejícího letadla [3].



Obrázek 30 Přistání za těžším letadlem [3]

5.1.8 Křižující se dráhy

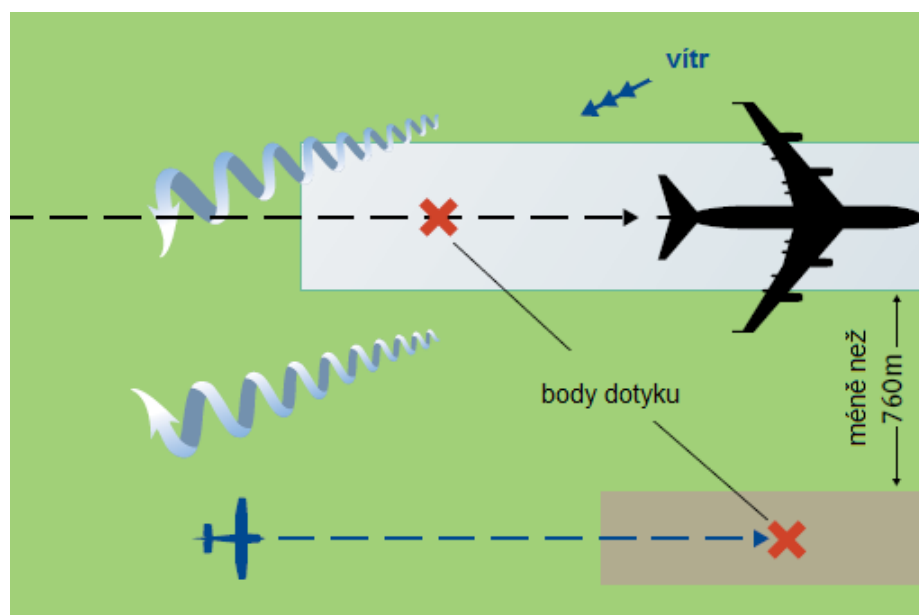
Pokud přistáváte na křižující se dráze s dráhou, ze které vzletl těžší letoun nebo na ní přistál, plánujte bod dotyku v dostatečné vzdálenosti před nebo za křížením drah a k němu přilehlé oblasti, která může být zasažena úplavem. Podobný postup použijte pro vzlet, bod odpoutání musí být mimo zasaženou oblast. Mějte na paměti též účinky větru, který víry snáší [3].



Obrázek 31 Přistání po křižování dráhy těžším letadlem [3]

5.1.9 Boční vítr

Boční vítr může významně ovlivnit polohu vírů úplavu, to může být nebezpečné zejména při přistání na paralelní dráhu. Náležitě podle toho upravte bod dotyku [3].



Obrázek 32 Přistání za těžším letadlem na paralelní dráze [3]

5.1.10 Vybírání nezvyklých poloh způsobených turbulencí v úplavu

Pokud se náhle ocitnete v turbulenci v úplavu, řešení této situace ovlivňuje řada faktorů, ale následující technika navržená piloty společnosti Fighter Combat International se osvědčila jako účinná.

POWER – PUCH – ROLL (neboli česky: výkon – potlačit – náklon)

POWER – zvyšte výkon motoru, především v malých výškách a nízkých rychlostech

PUSH – potlačte řídicí páku, pokud nejste omezeni blízkostí terénu. Tím snížíte úhel náběhu, což dává křídélkům vyšší účinnost při klonění. Také se sníží odpor letadlo pro lepší akceleraci. A pokud jste již přetočení v poloze na zádech, sníží to klesání k zemi.

ROLL – pokud je to možné upravte náklon takovým směrem rotace, aby to snížilo zatížení křídel (což záleží na směru rotace víru), nebo směrem k nejbližšímu horizontu. Popřípadě pokračujte v rotaci udané vírem (bez zatížení) k horizontu. Pokud zde existuje i zatáčivý moment příslušné zásahy směrového řízení jsou také doporučeny.

Tato technika byla primárně vyvinuta pro vlétnutí do úplavu při akrobacii a létání těsně za ocasem jiného stroje, případně při vzdušných soubojích. Měla by dobře fungovat ve výšce, ale při letu v malých výškách při vzletu a přistání není ideální odlehčovat zatížení potlačením [3].

5.2 Vlastní doporučení a případné inovace

Z informací vyplývajících z předchozích kapitol by se dala problematika předcházení nehod v důsledku turbulence v úplavu rozdělit na dvě základní části:

- a) problematiku všeobecného letectví, respektive letů za VFR a vizuálních přiblížení a provozu na neřízených letištích
- b) a problematiku letů převážně obchodní letecké dopravy, za IFR, na velkých mezinárodních řízených letištích

5.2.1 Všeobecné letectví, lety VFR, neřízená letiště

V této části je třeba se zaměřit na snižování počtu potenciálních nehod a incidentů spojených s turbulencí v úplavu. Jelikož se jedná většinou o malá letadla za VFR nejsou zde doporučeny žádné minimální rozstupy a piloti musí dodržovat vlastní bezpečné rozstupy dle uvážení. Proto navrhuji během výcviku klást větší důraz na seznámení pilotů s dopady turbulence v úplavu a jak se jí vyhýbat, zejména z praktického hlediska. To je potřebné především na neřízených letištích, kde se piloti budou setkávat s lehkými letadly, které se svou MTOW blíží kategorii MEDIUM nebo vrtulníky, což může být zejména za klidné atmosféry nebezpečné. Je nutné, aby měli představu o velikosti potřebného rozstupu, který však musí dodržovat na vlastní odpovědnost. Je třeba si uvědomit, že statisticky největší riziko vzniká při přiblížení z okruhu za přilétávajícím těžším letadlem, které provádí přímé přiblížení, proto se nebojte provést vyčkávací 360° stupňovou zatáčku v případě, že si nejste jisti, zda rozstup je dostatečný.

Naopak při letu malým letadlem na velká frekventovaná letiště je třeba se seznámit s problematikou rozstupů, které jsou poskytovány dispečery. Ale opět při vizuálním přiblížení padá odpovědnost za rozstupy pouze na pilota. V případě jakýchkoliv pochybností se nebojte obrátit na dispečera pro povolení zvětšení rozstupu od jiného provozu.

V poslední řadě této části též navrhuji školení pro dispečery služeb AFIS a RADIO, které působí na neřízených letištích se zaměřením na problematiku turbulence v úplavu. Tito dispečeré jsou poslední možností, jak zachránit posádku, která pochybila v odhadu rozstupu, nebo v horším případě vůbec neví, že by bylo vhodné v dané situaci nějaký aplikovat.

5.2.2 Obchodní letecká doprava, lety IFR, řízená letiště

V této části je již dlouhou dobu bezpečnost na vysoké úrovni a metodika minimálních rozstupů je dobře propracovaná a zvládnutá. Naopak s rostoucím zatížením velkých mezinárodních letišť roste požadavek na zvýšení kapacity. Jednou z možností, jak určitého zvýšení kapacity dosáhnout je snížení a optimalizace rozstupů, které jsou již několik desítek let staré. Jak FAA, tak i EUROCONTROL mají vyvinutou metodiku re-kategorizace a na některých letištích se již

s úspěchem používá, viz kapitoly 3.2 a 3.3. V dalších krocích se chystají další re-kategorizace a optimalizace rozstupů přímo pro danou dvojici inkriminovaných letadel.

Použití LIDARů:

LIDAR (Light Detection And Ranging) je přehledové zařízení měřící vzdálenost k cíli pomocí ozařování cíle pulzy laserového světla a měření odražených pulzů. Na rozdíl od RADARu, který pracuje na podobném principu, ale s radiovými vlnami může LIDAR měřit pohyby vzduchu v atmosféře i bez přítomnosti částic vody (např. v oblačnosti) o, které se mohou radiové vlny odrazit. Pohyby vzduchu zapříčiní mírnou změnu indexu lomu prostředí, což vede ke změně vlnové délky odraženého paprsku, kterou zařízení vyhodnocuje [23].

Všechny výše zmíněné re-kategorizace, ale pracují pouze s parametry daných letadel a velkým množstvím experimentálních měření. Turbulence v úplavu je, ale nemalou mírou ovlivněna okamžitým stavem atmosféry, především rychlostí větru (ta je nejvíce proměnlivá). Proto navrhuji v dalších fázích re-kategorizace přihlédnout k této skutečnosti a za použití letištních LIDARů, které se používají při experimentálních měřeních úplavů, měřit aktuální sílu a délku života vírů v daném stavu atmosféry a podle toho i upravovat aktuální minimální potřebné rozstupy. To by mohlo vést k dalšímu navýšení kapacity letišť bez dopadu na bezpečnost. Systémy LIDAR již některá letiště (např. Hong Kong) používají pro zjišťování stříhu větru, proto by bylo výhodné pro měření indukovaných vírů použít již existujících zařízení. V případě náhlé změny, by tyto zařízení mohly včas varovat piloty, před vlétnutím do neočekávaného úplavu [24].

Potenciál LIDARů je však větší než být pouze pozemní stanicí. Podobně jako by kdysi nikdo nečekal, že velké pozemní RADARy budou jednou běžnou součástí palubního vybavení letadel. A dnes jsou palubní meteoradary nepostradatelnou a samozřejmou výbavou dopravních letadel. Mohly by v budoucnu podobné využití mít i LIDARy, (které jsou již dnes značně kompaktními zařízeními) a to nejen pro detekci turbulence v úplavu, ale také stříhu větru, jiné turbulence v bezoblačném ovzduší, sopečného popela nebo nebezpečných microburstů. V oblasti varování před turbulencí v úplavu by mohly být nepostradatelnými pomocníky zejména na trati v letových hladinách, kde se mohou víry v řídkém vzduchu a oblastech slabého větru rozpadat velmi pomalu a známe více případů incidentů vlétnutí do neočekávaného úplavu i přes dodržení traťových rozstupů. V okolí letišť by sice mohlo být včasné varování před úplavem zajištěno pozemními zařízeními, ale varování z palubního zařízení by bylo jistě rychlejší [25].

6 Závěr

Dnes, v době, kdy se letecká doprava stává stále běžnějším způsobem dopravy a je vytíženější než kdy dříve, roste potřeba vměstnat čím dál více letadel do omezených prostorů, zejména v okolí letišť při přiletu a odletu. Pokud má zůstat zachována vysoká úroveň bezpečnosti při stálém navyšování kapacit, je třeba brát v úvahu riziko turbulence v úplavu a pracovat se znalostmi o tomto jevu při optimalizace postupů.

Při studiu do úvodu problematiky tohoto jevu by měla pomoci i tato bakalářská práce, která spojuje fyzikální základy turbulence v úplavu, předpisovou stránku postupů týkajících se jí a na nehodách názorně ukazuje následky jejího působení a způsoby, jak jim předejít.

Pro piloty je především důležité pochopit jakými zákonitostmi se řídí vznik tohoto jevu, jak důležitou roli hraje nejen hmotnost letadla, ale také jeho rychlost, úhel náběhu a mnoho dalších faktorů, v neposlední řadě je vždy potřeba počítat s větrem, který víry snáší a pokud je jeho rychlost nízká, nebezpečně se zvyšuje délka života těchto vírů. Piloti by nikdy neměli spoléhat pouze na řídicí letového provozu a vždy by si měli udržovat situační přehled, jaká letadla se v jejich blízkosti pohybují a zdali nepředstavují nebezpečí, ať formou svého úplavu nebo něčím jiným. Posádky obchodní letecké dopravy bývají většinou velmi dobře vycvičené, na problematiku turbulence v úplavu by se, ale nemělo zapomínat ani u pilotů létajících pouze pro radost a převážně s lehkými stroji, protože právě takovým letadlům hrozí největší nebezpečí při vlétnutí do úplavu za o něco větším letounem.

Co se týká otázky zvyšování kapacit frekventovaných letišť a celkové optimalizace, je jedinou cestou kupředu přepracování systémů rozstupů. Na obou koncích Atlantického oceánu se již touto cestou vydali, a přestože implementace nových postupů na všechna letiště ještě nějakou dobu potrvá, jsou už vidět první zlepšení s opuštěním starých postupů podle ICAO a příchodem re-kategorizací. A bude zajímavé sledovat další stupně re-kategorizací, které by měly používat přesné rozstupy optimalizované pro určitou dvojici letadel (ve vztahu vedoucí / následující). Do budoucna věřím, že se bude problematika optimalizovaných rozstupů dále rozvíjet a pomáhat zvyšovat kapacity letišť se zachováním, nebo dokonce zvýšením bezpečnosti provozu. Výrazný pokrok by mohlo přinést použití LIDARů, které se již dnes používají k experimentálnímu měření turbulencí v úplavu nebo přímo v provozu na letištích ke zjišťování stříhu větru. Všechny výše zmíněné inovativní možnosti popisuje tato práce a snad bude pro někoho inspirací pro prohloubení výzkumu a následném zavedení do praxe těchto nových a jistě velmi užitečných technologií.

Já sám musím uznat, že studium podkladů pro napsání této práce a psaní samotné mi bylo přínosem, jakožto pilotovi, pro pochopení tohoto jevu a uvědomění si možného rizika. Tím

spíše když se jedná o jev pro lidské oko neviditelný. Věřím, že nejen pro mě, ale pro všechny piloty, kteří neberou létání na lehkou váhu, by studium a porozumění tohoto jevu bylo jistě přínosem.

7 Seznam použité literatury

1. Wake Vortex Turbulence. SKYbrary [online]. 2017 [cit. 2017-06-23]. Dostupné z: https://www.skybrary.aero/index.php/Wake_Vortex_Turbulence
2. BROŽ, Václav. *Aerodynamika nízkých rychlostí: Určeno pro stud. fak. strojní*. 3. vyd. Praha: ČVUT, 1990. ISBN 80-010-0198-9.
3. Civil Aviation Authority of New Zeland: Wake Turbulence. Good Aviation Practise. 2008.
4. ICAO: Doc 9426-AN/924 Air Traffic Services Planing Manual. Chapter 3 Wake Turbulence
5. *Wake turbulence aspects of Airbus A380-800 aircraft*. In: . INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION, 2008. Dostupné také z: https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/field_tabs/content/documents/nm/airports/airports-wake-vortex-aspects-letter-a380-aircraft1.pdf
6. *PROCEDURES FOR AIR NAVIGATION SERVICES - Air Traffic Management*. In: . Canada: INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION, 2016, Sixteenth Edition, Doc 4444. Dostupné také z: <http://flightservicebureau.org/wp-content/uploads/2017/03/ICAO-Doc4444-Pans-Atm-16thEdition-2016-OPSGROUP.pdf>
7. ROOSELEER, Frédéric a Vincent TREVE. *"RECAT-EU" European Wake Turbulence Categorisation and Separation Minima on Approach and Departure*. Brussels: EUROCONTROL Headquarters, 2015.
8. Wake Turbulence. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2017-07-21]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Wake_turbulence#cite_note-5
9. WW24, vicinity John Wayne Airport Santa Ana CA USA, 1993. In: *SKY brary: reference for aviation safety knowledge* [online]. 2016 [cit. 2017-08-21]. Dostupné z: https://www.skybrary.aero/index.php/WW24,_vicinity_John_Wayne_Airport_Santa_Ana_CA_USA,_1993
10. B735, en-route, North East of London UK, 1996. In: *SKY brary: reference for aviation safety knowledge*[online]. 2016 [cit. 2017-08-21]. Dostupné z: https://www.skybrary.aero/index.php/B735,_en-route,_North_East_of_London_UK,_1996
11. C185, Wellington New Zealand, 1997. In: *SKY brary: reference for aviation safety knowledge* [online]. 2016 [cit. 2017-08-21]. Dostupné z: https://www.skybrary.aero/index.php/C185,_Wellington_New_Zealand,_1997

12. B733, en-route, Santa Barbara CA USA, 1999. In: *SKY brary: reference for aviation safety knowledge*[online]. 2016 [cit. 2017-08-21]. Dostupné z: https://www.skybrary.aero/index.php/B733,_en-route,_Santa_Barbara_CA_USA,_1999
13. A30B, en-route, Bristol UK, 2000. In: *SKY brary: reference for aviation safety knowledge* [online]. 2016 [cit. 2017-08-21]. Dostupné z: https://www.skybrary.aero/index.php/A30B,_en-route,_Bristol_UK,_2000
14. *Mayday Air Disaster* 13. řada, 5. díl Queens Catastrophe [epizoda z dokumentárního seriálu] Režie Tim WOLOCHATIUK. Kanada, 2014.
15. *Aircraft Accident Report: In-Flight Separation of Vertical Stabilizer, American Airlines Flight 587, Airbus Industrie A300-605R, N14053, Belle Harbor, New York, November 12, 2001* [online]. In: . Washington, D. C.: National Transportation Safety Board, 2004 [cit. 2017-08-21]. Dostupné z: <http://www.skybrary.aero/bookshelf/books/523.pdf>
16. A320, en-route, North East Spain 2006. In: *SKY brary: reference for aviation safety knowledge* [online]. 2016 [cit. 2017-08-21]. Dostupné z: https://www.skybrary.aero/index.php/A320,_en-route,_North_East_Spain_2006
17. A319 / B744, en-route near Oroville WA USA, 2008. In: *SKY brary: reference for aviation safety knowledge*[online]. 2017 [cit. 2017-08-21]. Dostupné z: https://www.skybrary.aero/index.php/A319/_B744,_en-route_near_Oroville_WA_USA,_2008
18. SF34, vicinity Sydney Australia, 2008. In: *SKY brary: reference for aviation safety knowledge* [online]. 2016 [cit. 2017-08-21]. Dostupné z: https://www.skybrary.aero/index.php/SF34,_vicinity_Sydney_Australia,_2008
19. P28A / S76, Humberside UK 2009. In: *SKY brary: reference for aviation safety knowledge* [online]. 2016 [cit. 2017-08-21]. Dostupné z: https://www.skybrary.aero/index.php/P28A/_S76,_Humberside_UK_2009
20. A388/A320, vicinity Frankfurt Germany, 2011. In: *SKY brary: reference for aviation safety knowledge*[online]. 2016 [cit. 2017-08-21]. Dostupné z: https://www.skybrary.aero/index.php/A388/A320,_vicinity_Frankfurt_Germany,_2011
21. SCHWARZ, Carsten a Dietrich FISCHENBERG. WAKE TURBULENCE HAZARD ANALYSIS FOR GENERAL AVIATION ACCIDENT. In: *Deutsche Gesellschaft für Luft - und Raumfahrt* [online]. Braunschweig: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2014 [cit. 2017-08-22]. Dostupné z: <http://www.dgflr.de/publikationen/2014/340177.pdf>

22. E170, en-route, Ishioka Japan, 2014. In: *SKY brary: reference for aviation safety knowledge* [online]. 2017 [cit. 2017-08-21]. Dostupné z:
https://www.skybrary.aero/index.php/E170,_en-route,_Ishioka_Japan,_2014
23. Lidar. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2017-08-22]. Dostupné z:
https://en.wikipedia.org/wiki/Lidar#Airborne_lidar
24. CHAN, Pak-wai. Advantages of Short Range LIDAR in Windshear Alerting. In: *Hong Kong Observatory*[online]. 2013 [cit. 2017-08-22]. Dostupné z:
http://www.hko.gov.hk/education/edu01met/wxobs/ele_shortlidar_e.htm
25. Light Detection And Ranging (LIDAR). In: *SKY brary: reference for aviation safety knowledge* [online]. 2017 [cit. 2017-08-21]. Dostupné z:
[http://www.skybrary.aero/index.php/Light_Detection_And_Ranging_\(LIDAR\)](http://www.skybrary.aero/index.php/Light_Detection_And_Ranging_(LIDAR))

8 Seznam obrázků

- Obrázek 1 Pohled zezadu na letadlo produkující víry úplavu, levý vír rotuje ve směru hodinových ručiček, pravý proti směru hodinových ručiček
- Obrázek 2 Zjednodušené proudění okolo vrtulníku při visení na místě v blízkosti země
- Obrázek 3 Zjednodušené indukované víry produkované vrtulníkem během dopředného letu
- Obrázek 4 Dvouminutový rozstup pro následující letadlo
- Obrázek 5 Dvouminutový rozstup z důvodu turbulence v úplavu pro křížující letadlo
- Obrázek 6 Tříminutový rozstup pro následující letadlo
- Obrázek 7 Dvouminutový rozstup pro letadlo vzletající v opačném směru
- Obrázek 8 Dvouminutový rozstup pro letadlo přistávající v opačném směru
- Obrázek 9 Porovnání siluet dvou letounů spadajících podle ICAO do stejné kategorie HEAVY
- Obrázek 10 Změna rozstupů podle RECAT-EU mezi letouny, které oba spadají do kategorie HEAVY podle ICAO
- Obrázek 11 Schéma rozdělení letadel do nových kategorií podle RECAT-EU
- Obrázek 12 Polohy letounů A300 a B747 s příslušnými výškami ze sekundárního radaru letiště JFK
- Obrázek 13 Graf průběhu výchylek beranů řízení těsně před ztrátou kýlové plochy
- Obrázek 14 Graf průběhu výchylek pedálů řízení těsně před ztrátou kýlové plochy
- Obrázek 15 DR 400 těsně před střetem se zemí s plně vychýleným křídélky pro vyrovnání náklonu
- Obrázek 16 Čelní pohled na letouny DR 400 (výše) a An-2 (níže), přibližně v měřítku
- Obrázek 17 Rozpad víru úplavu An-2 bez atmosférické turbulence (model D2P)
- Obrázek 18 Rozmístění vektorů rychlosti ve víru úplavu An-2 v čase t ($t = 40$ s, $\Gamma = 76$ m²/s)

- Obrázek 19 Laterální rozmístění vertikální složky rychlosti vírů úplavu, pro pozice ve středu vírů (rozpětí křídel DR 400 je umístěno do středu levého víru, zobrazeno v měřítku)
- Obrázek 20 Rychlosti vírů úplavu v čase t ($t = 40$ s, $\Gamma = 76$ m²/s) v m/s na svislém řezu kolmém k osám vírů
- Obrázek 21 Rozmístění hodnot RCR pro DR 400 za An-2 v čase t ($t = 40$ s, $\Gamma = 76$ m²/s)
- Obrázek 22 Oblasti s hodnotami RCR větší než 100 % pro DR 400 za An-2 pro jednotlivé časy t (20 s, 40 s (červeně), 60 s, 80 s, klesání vírů není bráno v úvahu, oba letouny přibližně v měřítku)
- Obrázek 23 Celkový průběh vzletu An-2 (trajektorie modře) s červeně vyznačenými elipsami s RCR větším než 100 % pro DR 400
- Obrázek 24 Pohled z křídla DR 400 na maximální úhel náklonu (110°) při vlétnutí do úplavu za An-2
- Obrázek 25 Trajektorie zúčastněných letounů zobrazené na mapě
- Obrázek 26 Vzlet za větším letadlem
- Obrázek 27 Vzlet po přistání většího letadla
- Obrázek 28 Sledování paralelní trati během stoupání
- Obrázek 29 Přistání po vzletu těžšího letadla
- Obrázek 30 Přistání za těžším letadlem
- Obrázek 31 Přistání po křížování dráhy těžším letadlem
- Obrázek 32 Přistání za těžším letadlem na paralelní dráze

9 Seznam tabulek

| | |
|-----------|---|
| Tabulka 1 | Rozstupy založené na vzdálenosti podle ICAO |
| Tabulka 2 | Rozstupy pro přiblížení nebo vzlet založené na vzdálenosti podle REACT-EU |
| Tabulka 3 | Rozstupy pro vzlet založené na čase podle REACT-EU |
| Tabulka 4 | Rozdíl rozstupů založených na vzdálenosti (ICAO / RECAT-EU) |
| Tabulka 5 | Rozdíl rozstupů založených na čase (ICAO / RECAT-EU) |
| Tabulka 6 | Rozstupy založené na vzdálenosti pro přiblížení podle FAA |
| Tabulka 7 | Základní parametry zúčastněných letadel |