



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

---

Fakulta dopravní  
Ústav letecké dopravy

**Experimentální ověření příčinnosti přiblížení při iluzi černé díry**  
**Experimental Verification of the Cause of Black Hole Approach**

**Diplomová práce**

Studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojiích

Studijní obor: Provoz a řízení letecké dopravy

Vedoucí práce: doc. Ing. Bc. Vladimír Socha, Ph.D.

Ing. Lenka Hanáková

---

**Bc. Zbyšek Petřík**

Praha 2022



**K621** ..... **Ústav letecké dopravy**

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Bc. Zbyšek Petřík**

Studijní program (obor/specializace) studenta:

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

Název tématu (česky): **Experimentální ověření příčinnosti přiblížení  
při iluzi černé díry**

Název tématu (anglicky): **Experimental Verification of the Cause of Black Hole  
Approach**

### **Zásady pro vypracování**

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem diplomové práce je experimentální ověření příčinnosti nestandardního přiblížení u pilotů pod vlivem iluze tzv. černé díry. Výsledky by měly experimentálně ověřit hypotézy o příčinách vzniku této vizuální iluze.
- Vypracujte analýzu současného stavu v oblasti vizuálních iluzí, s hlavním ohledem na tzv. Black hole approach. Při analýze současného stavu využijte princip systematické rešerše PRISMA.
- Na základě analýzy současného stavu identifikujte základní hypotézy popisující příčinnost vzniku iluze černé díry ovlivňující konečné přiblížení.
- Navrhněte experiment s využitím virtuální reality s implementovaným systémem sledování očí pro navození iluze a naměřte vhodná data. Experiment vykonajte na reprezentativním vzorku subjektů.
- Naměřená data vyhodnoťte vhodnými metodami.
- Výsledky interpretujte a diskutujte. Stanovte závěry práce.



- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího diplomové práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: Newman, David G. An overview of spatial disorientation as a factor in aviation accidents and incidents. Canberra City, A.C.T: Australian Transport Safety Bureau, 2007.
- Previc, Fred H., and William R. Ercoline. Spatial disorientation in aviation. Reston, Va: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Bc. Vladimír Socha, Ph.D.**  
**Ing. Lenka Hanáková**

Datum zadání diplomové práce: **17. července 2020**  
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **16. května 2022**  
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia  
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

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



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

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

Bc. Zbyšek Petřík  
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 2. prosince 2021



## Abstrakt

Vizuální iluze v letectví mohou být velmi časté a nebezpečné. Mohou způsobit prostorovou dezorientaci a v krajních případech tak může let skončit katastrofou. Metodika vypracování teoretické části spočívala ve vytvoření souhrnu známých druhů vizuálních iluzí s důrazem na iluzi černé díry. Praktická část se zabývala experimentálním ověřením příčinnosti nestandardního přiblížení u pilotů pod vlivem zmíněné iluze. Experimentu se zúčastnilo celkem 48 pilotů, jejichž úkolem bylo zalétnout na VR simulátoru 4 vizuální přiblížení v následujícím pořadí: přiblížení ve dne, přiblížení v noci bez PAPI světél, přiblížení v noci s PAPI světly, přiblížení v noci bez PAPI světél. Během experimentálních měření docházelo ke sběru dat jak letových, tak dat ze sledování pohybu očí. Daná data byla následně analyzována vhodnými metodami a prezentována. Výsledná data ukazují na značnou incidenci nebezpečně nízkých přiblížení při simulovaných podmínkách zkoumané iluze. Závěrem práce jsou doporučení pro další směřování výzkumu tématiky a evaluace dosavadních hypotéz oproti výsledkům studie.

**Klíčová slova:** vizuální iluze, létání v noci, iluze černé díry, přesnost pilotáže, virtuální realita, sledování očí



## Abstract

Visual illusions in aviation can be frequent and dangerous phenomenon. They can cause spatial disorientation and, in extreme cases, might even end in a disaster. The methodology of the theoretical part consisted in creating a summary of the known types of visual illusions with emphasis on the black hole illusion. The practical part dealt with the experimental verification of the causality of non-standard approach in pilots under the influence of the mentioned illusion. A total of 48 pilots participated in the experiment and their task was to fly 4 visual approaches on a VR simulator in the following order: approach in the daytime, approach at night without PAPI lights, approach at night with PAPI lights, approach at night without PAPI lights. During the experimental measurements, both flight data and eye movement tracking data were collected. The data were then analyzed using appropriate methods and presented. The resulting data indicate a significant incidence of dangerously low approaches under the simulated conditions of the illusion under investigation. The paper concludes with recommendations for further research directions on the topic and an evaluation of the existing hypotheses against the results of the study.

**Keywords:** visual illusions, night flying, black hole illusion, piloting precision, virtual reality, eye-tracking



## **Poděkování**

Na tomto místě bych chtěl v poděkovat doc. Ing. Bc. Vladimíru Sochovi, Ph.D. a Ing. Lence Hanákové za odborné vedení práce, za jejich čas strávený konzultacemi, pomoci při práci s šablonou a vstřícný přístup a podporu při dokončení diplomové práce. Pomoc s přípravou a prováděním experimentu poskytla Ing. Liana Karapetjan, které tímto děkuji. Na závěr děkuji bratru Vítkovi a své rodině.



## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Název práce* vypracoval samostatně a použil k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k diplomové práci.

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

Praze dne 16. května 2022

.....  
*Podpis*



## Obsah

<b>Úvod</b>	<b>11</b>
<b>1 Teoretický základ</b>	<b>14</b>
1.1 Vizuální iluze . . . . .	14
1.1.1 Iluze tvaru dráhy, sklonu dráhy a sklonu terénu před dráhou . . . . .	15
1.1.2 Autokineze . . . . .	18
1.1.3 Falešný horizont . . . . .	18
1.2 Iluze černé díry . . . . .	19
1.2.1 Incidentsy a nehody . . . . .	21
1.2.2 Analýza současného stavu . . . . .	22
1.2.3 Základní hypotézy příčinnosti . . . . .	30
<b>2 Metody</b>	<b>33</b>
2.1 Scénář experimentu . . . . .	33
2.2 Letový simulátor . . . . .	35
2.3 Subjekty . . . . .	38
2.4 Záznam a extrakce dat . . . . .	39
2.4.1 Letová data . . . . .	39
2.4.2 Data sledování očí . . . . .	41
2.5 Statistické metody . . . . .	44
2.5.1 Letová data . . . . .	44
2.5.2 Eye-tracking data . . . . .	45
2.5.3 Test hypotéz . . . . .	45
<b>3 Presentace výsledků</b>	<b>46</b>
3.1 Letová data . . . . .	46
3.1.1 Rychlost . . . . .	46
3.1.2 Vertikální profil . . . . .	49
3.2 Vizuální fokus a rozdělení pozornosti . . . . .	56
3.3 Zpětná vazba po experimentu . . . . .	63





<b>4</b>	<b>Diskuze</b>	<b>65</b>
4.1	Vertikální profil a rychlost . . . . .	65
4.2	Rozdělení pozornosti . . . . .	67
<b>5</b>	<b>Závěr</b>	<b>68</b>
	<b>Seznam použité literatury</b>	<b>70</b>



## Seznam obrázků

1.1	Stabilizované přiblížení . . . . .	15
1.2	Přiblížení na širokou dráhu . . . . .	16
1.3	Přiblížení na úzkou dráhu . . . . .	16
1.4	Přiblížení na dráhu z kopce . . . . .	16
1.5	Přiblížení na dráhu do kopce . . . . .	17
1.6	Přiblížení na dráhu přes stoupající terén . . . . .	17
1.7	Přiblížení na dráhu přes klesající terén . . . . .	18
1.8	Iluze falešného horizontu . . . . .	19
1.9	Přiblížení v podmínkách černé díry . . . . .	20
1.10	Porovnání nočních přiblížení s prostředím typickým pro černou díru se skrytým a viditelným horizontem. . . . .	21
1.11	Flow diagram systematické rešerše PRISMA . . . . .	24
1.12	Průběh přiblížení při stálém vizuálním úhlu . . . . .	30
1.13	Indikace jednotlivých světelných systémů. . . . .	31
2.1	Přiblížení na dráhu 29 na letišti LKKV. . . . .	34
2.2	Schématický náskres měřeného sestupu . . . . .	34
2.3	Palubní deska letounu Beechcraft Baron . . . . .	35
2.4	Biofeedback VR simulátor . . . . .	36
2.5	Systémy používané k ovládání letadla na simulátoru. . . . .	36
2.6	FOVE VR headset . . . . .	37
2.7	Celkový nálet subjektů . . . . .	38
2.8	Celkový noční nálet subjektů . . . . .	38
2.9	Celkový přístrojový nálet subjektů . . . . .	39
2.10	Ukázka označování AOI . . . . .	42
2.11	Ukázka detekovaných objektů . . . . .	43
2.12	Vizualizace odstranění zákmitů na části dat . . . . .	43
3.1	Distribuce RMSE pro rychlost . . . . .	47
3.2	Post-hoc analýza RMSE rychlost . . . . .	47
3.3	Distribuce průměrné rychlosti . . . . .	48



3.4	Distribuce směrodatné odchylky pro rychlost . . . . .	48
3.5	Vertikální profil prvního letu . . . . .	49
3.6	Vertikální profil druhého letu . . . . .	50
3.7	Vertikální profil třetího letu . . . . .	50
3.8	Vertikální profil čtvrtého letu . . . . .	51
3.9	Distribuce RMSE pro vertikální profil . . . . .	51
3.10	Post-hoc analýza – RMSE pro vertikální profil . . . . .	52
3.11	Distribuce průměrné vertikální odchylky . . . . .	52
3.12	Post-hoc analýza – průměrná vertikální odchylka . . . . .	52
3.13	Distribuce směrodatné odchylky pro vertikální profil . . . . .	53
3.14	Rozdělení sektorů indikace PAPI . . . . .	54
3.15	Distribuce procentuálního podílu nadstoupání . . . . .	54
3.16	Post-hoc nadstoupání . . . . .	55
3.17	Distribuce procentuálního podílu podklesání . . . . .	55
3.18	Post-hoc podklesání . . . . .	56
3.19	Distribuce rozdělení pozornosti na venkovní scénu . . . . .	56
3.20	Post-hoc pohled ven . . . . .	57
3.21	Distribuce rozdělení pozornosti na hlavní letové přístroje . . . . .	57
3.22	Distribuce rozdělení pozornosti na výškoměr . . . . .	58
3.23	Post-hoc pohled na výškoměr . . . . .	58
3.24	Distribuce rozdělení pozornosti na rychloměr . . . . .	59
3.25	Post-hoc analýza – pohled na rychloměr . . . . .	59
3.26	Distribuce rozdělení pozornosti na umělý horizont . . . . .	60
3.27	Post-hoc analýza – pohled umělý horizont . . . . .	60
3.28	Distribuce rozdělení pozornosti na zatáčkoměr . . . . .	61
3.29	Post-hoc analýza – pohled zatáčkoměr . . . . .	61
3.30	Distribuce rozdělení pozornosti na směrový setrvačník . . . . .	62
3.31	Distribuce rozdělení pozornosti na variometr . . . . .	62
3.32	Respondenti a názor na simulaci BHI . . . . .	63
3.33	Respondenti a názor na VR při nočním výcviku . . . . .	63
3.34	Respondenti a jejich zkušenost se ztrátou orientace . . . . .	64



## Seznam symbolů a zkratk

°	Stupeň úhlu
%	Procento
$\tilde{x}$	Medián
<i>ft</i>	Stopa – měrová jednotka (Foot – dimensional unit)
<i>kt</i>	Uzly (Knots)
<i>m</i>	Metr – měrová jednotka (Meter – dimensional unit)
<i>NM</i>	Námořní míle (Nautical Mile)
ALS	Světelná přibližovací soustava (Approach Lighting System)
AMSL	Nad střední hladinou moře (Above Mean Sea Level)
APAPI	Zkrácená soustava indikace sestupové roviny pro přesné přiblížení (Abbreviated Precision Approach Path Indicator)
BHI	Iluze černé díry (Black Hole Illusion)
CFIT	Řízený let do terénu (Controlled Flight Into Terrain)
ČVUT	České vysoké učení technické v Praze (Czech Technical University in Prague)
DER	Odletový konec dráhy (Departure End of Runway)
DME	Zařízení pro měření vzdálenosti (Distance Measuring Equipment)
EASA	Evropská agentura pro bezpečnost letectví (European Aviation Safety Agency)
GPO	Nadhodnocení úhlu sestupu (Glide-path Overestimation)
ICAO	Mezinárodní organizace pro civilní letectví (International Civil Aviation Organization)
IMC	Podmínky pro let podle přístrojů (Instrument Meteorological Conditions)
ILS	Přístrojový přistávací systém (Instrument Landing System)
PAD	Vnímaný úhel sestupu (Perceived Angle of Descent)
PAPI	Světelná soustava indikace sestupové roviny pro přesné přiblížení (Precision Approach Path Indicator)
RCNN	Region Based Convolutional Neural Networks
RMSE	Odmocnina ze střední kvadratické chyby (Root Mean Square Error)
ROI	Oblast zájmu (Region of Interest)
RWY	Vzletová a přistávací dráha (Runway)
THR	Práh dráhy (Runway Threshold)



- VASIS Světelné sestupové soustavy pro vizuální přiblížení (Visual Approach Slope Indicator System)
- VFR Pravidla pro let za vidu (Visual Flight Rules)
- VMC Podmínky pro let za vidu (Visual Meteorological Conditions)
- VR Virtuální realita (Virtual Reality)



## Úvod

Přestože žijeme v době ve které jsme obklopeni moderními technologiemi, které nám umožňují pohodlnější a bezpečnější život, stále existují určitá prostředí, která plně odhalují zranitelnost člověka. Jednou z mnoha příčin je nedokonalost lidských smyslů a vnímání, které představují omezující faktor v náročných prostředích a činnostech, jako je například řízení letadla a to zejména ve ztížených podmínkách, tedy především při nočním letu nebo nepříznivém počasí. Tyto faktory spolu s dalšími přispívajícími skutečnostmi, jako je náročná letová procedura nebo únava, mohou vést k tomu, že u člověka dojde k nesprávné interpretaci situace a ztrátě situačního povědomí ohrožující bezpečnost letu.

Letectví je odvětví, ve kterém je jako v málokterém jiném věnováno tolik pozornosti bezpečnosti. Vzhledem ke značnému zájmu veřejnosti vyskytujícímu se při téměř libovolné události týkající se leteckého provozu je však takový přístup pochopitelný. Častým předmětem diskuze je rizikovitost jednotlivých fází letu, kdy je za kritickou fází označováno přistání spolu s podobně hodnoceným vzletem.

Řízený let do terénu je jev, při kterém posádka spoléhající se na své chybné vnímání situace neúmyslně řídí a navádí letoun do nebezpečné polohy, což má v konečném důsledku za následek srážku s terénem. Často k tomuto jevu dochází při provádění závěrečných fází letu, přiblížení a přistání. Tyto náročné fáze vyžadují plné soustředění a uvědomění letové posádky vzhledem k náchylnosti k různým chybám a zejména iluzím.

Iluze černé díky, neboli *Black Hole Illusion (BHI)*, představuje jednu z těchto iluzí. Podle amerického ministerstva dopravy je popsána jako „Vliv absence terénních referencí, jako například při přistání nad vodou, tmavými oblastmi a terénem se sněhovou pokrývkou, může vytvořit iluzi, že letadlo je ve větší výšce, než ve skutečnosti je. Pilot, který tuto iluzi nerozpozná, provede nižší přiblížení.“.

S rozvojem letecké dopravy po druhé světové válce, kdy dochází k nárůstu objemu letů a zvyšování kapacity letounů v 70. letech 20. století začalo docházet k rezonujícím leteckým nehodám. Vzhledem k vysokému počtu obětí bylo nutné učinit kroky předcházející nehodám. Jeden ze stěžejních úkolů, vzhledem ke zmíněným statistikám bylo, mimo jiné, nutné snížit počet nehod, k nimž docházelo v důsledku nedostatečného vertikálního vedení při přiblížení.



Dosud existuje řada vysvětlení, proč tato iluze nastává a v jaké vzdálenosti od dráhy. Jedinou společnou věcí je absence terénu pro poskytnutí informace o velikosti, vzdálenosti a hloubky. Postupem času se díky zvyšující se úrovni teoretického vzdělání pilotů vliv vizuálních iluzí snižuje, ale je však obtížné překonat přesvědčující vizuální iluze i přes objektivní znalosti rozdílu mezi realitou a iluzí.

První významný výzkum provedl výzkumný tým společnosti Boeing [1]. Výzkumné programy tehdejší doby sestávaly ze speciálně vyvinutých fixních simulátorů vizuálního nočního přiblížení, který za variabilních podmínek osvětlení a dalších parametrů pilotovali zaměstnanci společnosti Boeing. Výsledky byly zveřejněny ve zprávě společnosti Boeing s názvem "Flight Deck Work Load and Night Visual Approach Performance".

Jedním z dalších vědců snažících se objasnit příčinnost a způsoby předcházení iluze přiblížení přes černou dírou byl také H. W. Mertens, který svůj výzkum inicioval v disertační práci [2], ve které analyzoval vliv vnímaného tvaru dráhy na odhad úhlu sestupu. Následující výzkumy se pak zaměřily spíše na možná řešení platná pro tehdejší období. Cílem bylo vyhodnotit dostupné naváděcí systémy, jako jsou různá světla pro přiblížení na dráhu a dva konkurenční systémy vertikálního navádění VASI a PAPI. Jedním z důkazů, že tyto studie představují zastaralé údaje a poznatky, je skutečnost, že preferovaný systém (T-VASIS) je v současné době plně nahrazen řešením PAPI jako preferovaným standardem ICAO [3].

Na základě výše uvedeného jsou oblastí zájmu této diplomové práce vizuální iluze, a to konkrétně iluze černé díry. Letovým iluzím není možné se zcela vyhnout, mohou se objevit u kteréhokoliv pilota nezávisle na úrovni zkušeností. Ve všech případech je však nutné vždy věřit přístrojům a vyřadit své pocity. Pokud se tak nestane, může být bezpečnost letu značně ohrožena. Proto si tato práce dává za cíl experimentálně stanovit příčinnost fenoménu iluze černé díry. Následujícím cílem je vypracování analýzy současného stavu týkající se iluze černé díry. Dále je úkolem definovat limitace současného stavu s možností rozšíření báze znalostí v této oblasti. Ačkoli mohou být letové iluze časté, není jim věnován dostatek pozornosti u civilních pilotů, a to jak z hlediska výcvikového, tak experimentálního. Na základě toho je součástí práce i praktická část. Ta je založena na návržení experimentu, který by zahrnoval samotné navození iluze černé díry se současným sběrem vhodných dat a vykonání studie na reprezentativním vzorku účastníků. Aby byla validní, je cílem vykonat zpracování dat vhodnými statistickými metodami a diskutovat zjištěné závěry práce. Výsledků je tedy dosahováno simulovanými lety s využitím



virtuální reality. Výsledná data ukazují na značnou incidenci nebezpečně nízkých přiblížení při simulovaných podmínkách zkoumané iluze. Závěrem práce jsou doporučení pro další směřování výzkumu tematiky a evaluace dosavadních hypotéz oproti výsledkům studie.





## 1 Teoretický základ

Následující část práce uvádí do problematiky vizuálních iluzí, jejich podstaty, příčinnosti a možných následků na bezpečnost letu.

Součástí kapitoly je obsáhlejší sekce věnující se konkrétní iluzi černé díry, která je hlavním zaměřením této práce. Představen je dosavadní výzkum prostřednictvím rešeršovaných studií a shrnutí známých hypotéz příčinnosti iluze.

### 1.1 Vizuální iluze

Létání letadlem je náročná činnost a může vystavit piloty mnoha potenciálním rizikům. Jedním z nejvýznamnějších rizik je prostorová dezorientace. Prostorová dezorientace je definována jako neschopnost přesně a správně určit svoji polohu, pohyb či rychlost vzhledem k okolnímu prostředí.

Pro zjišťování orientace těla v prostoru využívá lidské tělo tři integrované systémy, které spolupracují při zjišťování orientace těla v prostoru. Jedná se konkrétně o systém vestibulární, vizuální a somatosenzorický [4]. Informace ze zmíněných systémů se shromažďují v mozku a ve většině případů se shodují a dávají tak jasnou představu o orientaci těla v prostoru. Při létání však může dojít i k případům, kdy se do mozku dostávají rozporuplné informace, které pak mohou způsobit dezorientaci a vyvolat letové iluze.

Letové iluze jsou obecně definovány jako nesrovnalost mezi smysly pilota a realitou. Jedná se tedy o stav, kdy to, co pilot vnímá, neodpovídá skutečnosti. Letovým iluzím není možné se zcela vyhnout, jelikož se mohou objevit jak u zkušených pilotů, tak u začátečníků. V každém případě je velmi důležité se řídit pravidlem, že při boji s iluzemi je nutné vždy věřit přístrojům a vyřadit své pocity. Pokud se takto nestane, může pilot značně ohrozit bezpečnost letu či ztratit kontrolu nad letem. Podle analýzy FSF 76 nehod a incidentů při přiblížení a přistání bylo zjištěno, že 21 procent nehod bylo zapříčiněno právě dezorientací letové posádky nebo vizuálními iluzemi [5].

Dle místa vzniku konfliktu jsou letové iluze rozděleny na vestibulární a vizuální iluze [6]. Vzhledem k charakteru této práce se následující text zabývá vizuálními iluzemi.

Jelikož je vizuální systém dominantním systémem pro orientaci, mohou být vizuální iluze velmi silné. Mohou se objevit i za dobrého počasí a v mnoha případech vychází z představ, co by pilot „měl“ vidět nebo co očekává, že vidí [7]. Vizuální iluze jsou převážně dány absencí nebo změnou vizuálních referencí, které u pilota změni způsob vnímání své polohy, ať už vzhledem k dráze v

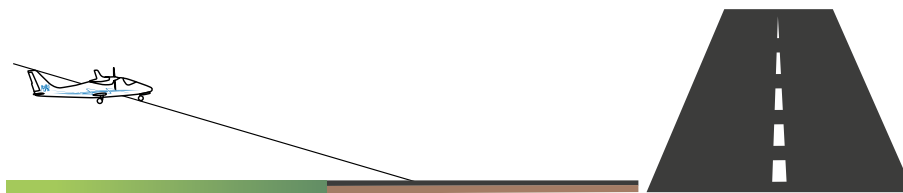
nejčastějších případech, nebo vzhledem k dalším referencím. To pak má za následek nepřesné či zcela špatné vyhodnocení výšky, vzdáleností nebo úhlů [8].

V následujících podkapitolách jsou jednotlivé vizuální iluze podrobně definovány spolu s popisem způsobu vzniku s primárním fokusem na iluzi černé díny.

### 1.1.1 Iluze tvaru dráhy, sklonu dráhy a sklonu terénu před dráhou

Při provádění vizuálního přiblížení na dráhu používá pilot systém PAPI nebo VASI. Tímto způsobem pilot udržuje sestupovou rovinu dle jejich indikace a na případné odchylky může ihned reagovat. Nejsou-li tyto systémy k dispozici pro danou dráhu, přechází pilot ke způsobu, u kterého vyhodnocuje klesání či výšku pouze subjektivně. Při tomto způsobu má pilot tendenci upravit sestup tak, aby vnímaný obraz dráhy upravit do očekávaného tvaru v poloze na přiblížení [9]. To je dáno tím, že v rámci percepce dochází k hodnocení vzhledem k minulým zkušenostem [10]. Výsledkem je vznik nebezpečí špatného odhadu výšky.

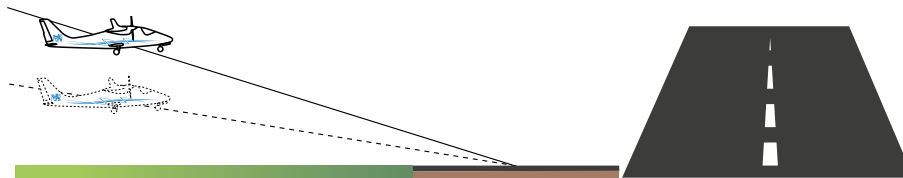
Provádí-li pilot přiblížení na dráhu, se kterou je dobře obeznámen, neměl by mít potíže správně vyhodnotit svou výšku (viz obrázek 1.1). Pokud je letadlo nízko, jeví se mu dráha jako plochá a krátká. V případě, že bude letadlo vysoko, bude se pilotovi dráha jevit dlouhá a úzká. Takové úvahy se však mění v případě, že se jedná o dráhy o jiné délce či šířce. Pokud si pilot nebude vědom toho, že dráha, na kterou dělá přiblížení, má ve skutečnosti jiný tvar než očekává, může dojít k iluzím [7]. Vliv na vnímání dráhy nemá pouze její tvar, ale i její sklon, respektive sklon před terénem. Ve všech případech však problém spočívá v tom, že se pilot snaží upravit svůj vnímaný obraz dráhy do již známého obrazu. Důsledkem jsou pak jak kladné, tak záporné odchylky od sestupové roviny.



Obrázek 1.1: Ideální profil stabilizovaného přiblížení na standardní dráhu.

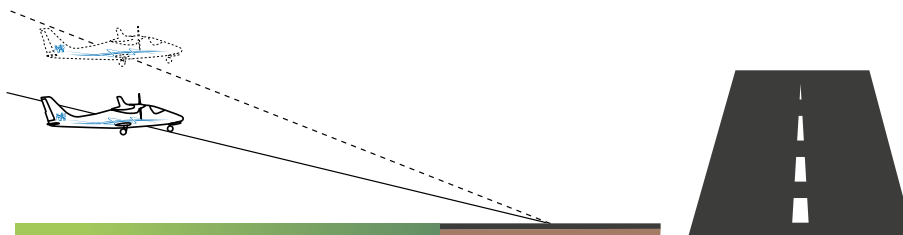
Přiblížení na neobvykle širokou dráhu může u pilota vyvolat pocit, že je níže než ve skutečnosti je. Pokud pilot tomuto pocitu podlehně, bude mít snahu přitáhnout řízením za účelem získání výšky.

To může vyústit nezdařeným přiblížením, či v krajních případech i pádem v nízké výšce [9]. Graficky je tato situace ilustrována na obrázku 1.2.



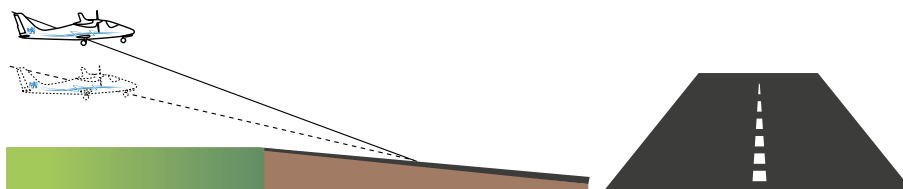
Obrázek 1.2: Přiblížení na nezvykle širokou dráhu.

Při přiblížení na neobvykle úzkou dráhu, viz obrázek 1.3, může u pilota vzniknout pocit, že je výše než ve skutečnosti je. Ve snaze snížit výšku, aby vnímal dráhu jako již známý obraz, může pilot reagovat potlačením řízení. V blízkosti země však tento manévr může způsobit náraz do překážky nebo do země [11].



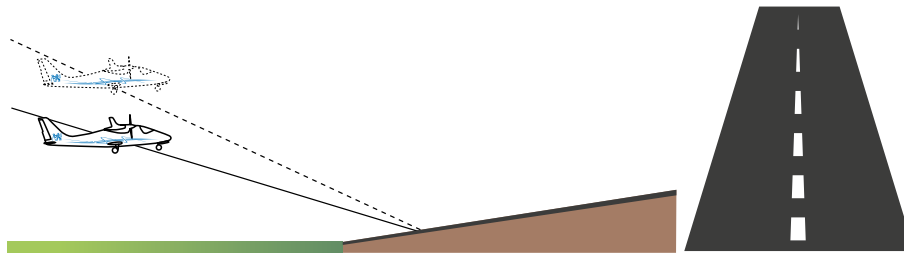
Obrázek 1.3: Přiblížení na nezvykle úzkou dráhu.

Přiblížení na dráhu z kopce vyvolává u pilota iluzi, že je níže než ve skutečnosti je. Pilot pak ve snaze vnímat dráhu v očekávané poloze může nesprávně přitáhnout řízením, aby získal výšku. Výsledkem bude, že pilot poletí výše, aby se mu dráha jevila tak, jak se mu obvykle jeví při určité vzdálenosti a výšce [7]. To však může vyústit pádem v nízké výšce nebo nezdařeným přiblížením. Grafické zobrazení tohoto případu je na obrázku 1.4.



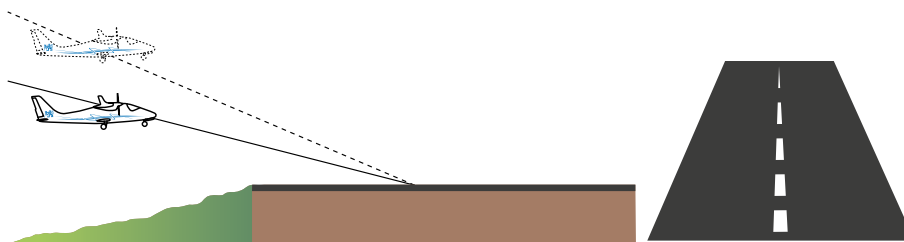
Obrázek 1.4: Přiblížení na nezvykle se svažující dráhu.

Opačný případ, tedy přiblížení na dráhu do kopce, jehož ilustrace je zobrazena na obrázku 1.5, způsobuje pocit vysokého přiblížení. Pilot pak má tendenci reagovat potlačením letadla, aby snížil výšku. Pokud by byl takový manévr proveden blízko země, může letadlo narazit do země nebo do překážky [9].



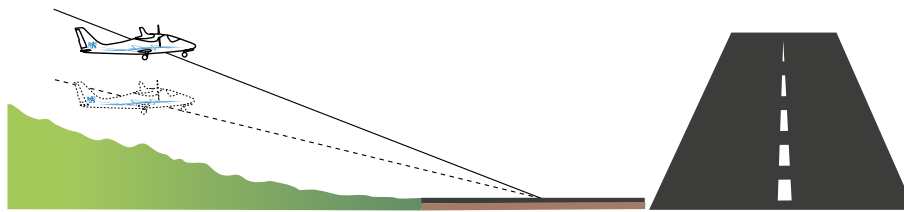
Obrázek 1.5: Přiblížení na nezvykle stoupající dráhu.

Podobně jako sklon dráhy může mít vliv na sestupovou rovinu i sklon terénu před dráhou. Při přiblížení přes stoupající terén, zobrazeno na obrázku 1.6, může mít pilot nesprávný pocit, že je výše, než ve skutečnosti je. Pokud pilot tomuto pocitu podlehně, tak za účelem snížení výšky potlačí řízením. Důsledkem je pak podklesání ideální sestupové roviny a plošší přiblížení. To je pak nutné kompenzovat přidáním otáček, aby došlo k dotyku alespoň na prahu dráhy [9].



Obrázek 1.6: Přiblížení na dráhu přes stoupající terén.

Přiblížení přes svažující se terén před dráhou může naopak vytvořit pocit, že je pilot níže, než ve skutečnosti je. Graficky je tato situace zobrazena na obrázku 1.7. Piloti ve snaze navýšit výšku reagují natažením letadla. Tímto se ale dostávají nad ideální sestupovou rovinu, což má za následek delší přistání, než bylo předpokládáno [9].



Obrázek 1.7: Přiblížení na dráhu přes svažující se terén.

### 1.1.2 Autokineze

Tato iluze může nastat zejména v noci nebo ve špatných vizuálních podmínkách, kdy je k dispozici stacionární světelný zdroj. Může se jednat například o hvězdu, či pozemní zdroj světla. Pokud pilot zaměří svou pozornost na zmíněné světlo, může mít pocit, že se dané světlo hýbe. Tento zdánlivý pohyb zdroje světla začíná po zhruba 10 s od začátku doby fixace [12]. Pokud dojde u pilota k autokinezi, může takto oscilující zdroj světla vyhodnotit například jako další letadlo.

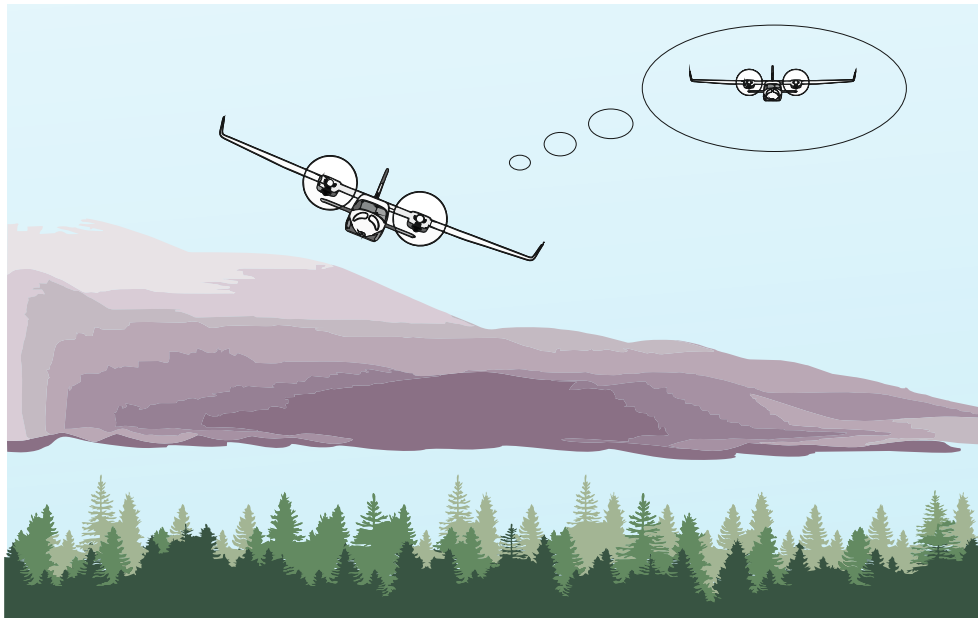
Aby se této iluzi předešlo, je doporučeno zaměřit oči na předměty v různých vzdálenostech a vyhnout se upoutání pohledu na jeden zdroj světla. Kromě vizuálního skenování lze tuto iluzi eliminovat i zvýšením počtu světelných bodů nebo změnou intenzity světla [11].

### 1.1.3 Falešný horizont

Jedná se o typ vizuální iluze, během kterého je přirozený horizont zatemněn nebo není zjevný [13]. V takových případech si pilot může zvolit jiný referenční bod. Bude-li ale takový referenční bod nakloněný, může být pilotem nesprávně interpretován jako horizontální a může dojít k vytvoření iluze falešného horizontu. V takovém případě může mít pilot tendenci srovnat křídla letadla s falešnou referencí [14]. Nebude-li pak správně skenovat přístroje, může dané iluzi podlehnout.

Typickým případem, kdy může iluze falešného horizontu nastat je tehdy, když probíhá let nad oblačností, která má daný sklon a nejsou k dispozici žádné jiné vizuální reference, viz obrázek 1.8. V tomto případě má pilot tendenci srovnat křídla letadla s vrstvou oblačnosti, která se mu jeví jako horizontální. Výsledkem je pak odklonění od původního směru a let s mírným náklonem [11, 13].

Tato iluze může nastat i v nočních podmínkách, a to tehdy, když dojde k zaměnění hvězd za světla na zemi. V případě letu nad relativně tmavou plochou, jako je tomu například při letu směrem ke břehu oceánu či velkého jezera může dojít k tomu, že pilot vyhodnotí světla na zemi jako hvězdy [11]. Podobně může navodit iluzi falešného horizontu i noční přiblížení k pobřežní oblasti pod úhlem



Obrázek 1.8: Iluze falešného horizontu iniciovaná nakloněnou oblačností.

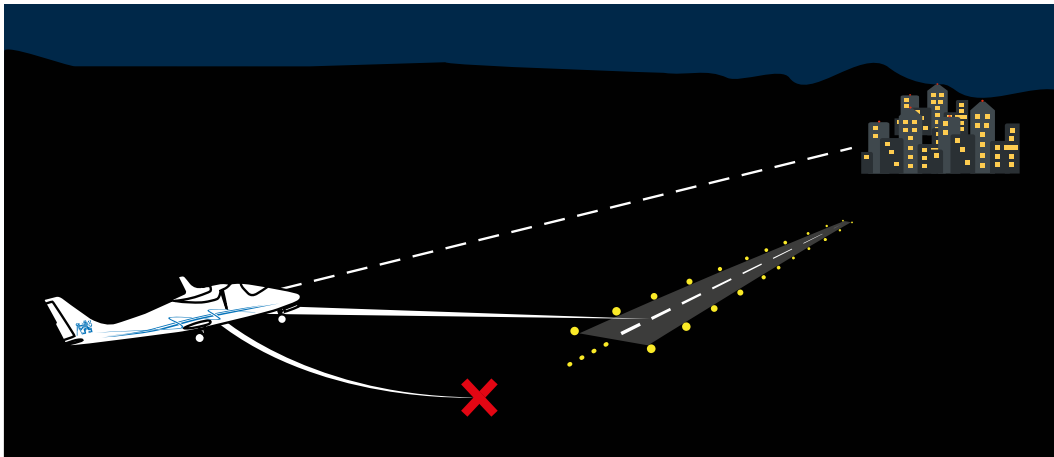
(tzn. ne kolmo). Je-li po okraji pobřeží osvětlená dálnice, mohou tato světla vést pilota k tomu, aby letěl proti nim jako k referenci. Pilot pak nesprávně uvede letadlo do určitého stupně náklonu. Takový případ může být nebezpečný v případě, když letadlo bude mít nízkou rychlost a malou výšku. Pokud této iluzi podlehně, může tato situace skončit i nárazem do země [7].

## 1.2 Iluze černé díry

Iluze černé díry je specifickým typem iluze, která nastává ve nevýrazném a jednotvárném terénu během přiblížení na přistání. Termín *Black hole illusion* byl poprvé použit v roce 1954 ve studii, která popisovala důležitost podnětů ve vizuálním poli a kritické role pozemní roviny pro vizuální referenci [15].

Iluze černé díry se netýká dráhy, ale terénu před dráhou. Typickým případem, kdy daná iluze může nastat je především při provádění přiblížení na přistání přes velkou vodní plochu nebo přes neosvětlený terén na osvětlenou dráhu, která je jediným zdrojem světla. U pilota to pak může vyvolat pocit toho, že je výše než ve skutečnosti je. Důsledkem takového pocitu pak může být nebezpečně nízké přiblížení [7].

Dalším přispívajícím faktorem může být městská zástavba se značným světelným vyzařováním, které posádku letounu vede k předčasnému sklesání, jelikož dochází k podhodnocení vzdálenosti od letounu k prahu dráhy. Situace je znázorněna na obrázku 1.9.



Obrázek 1.9: Přiblížení v podmínkách černé díry se znázorněnou zástavbou emitující světlo v prostoru za dráhovým systémem.

Iluze černé díry může být velmi nebezpečná a nenastává zřídka. Podle průzkumu, kterého se účastnilo 141 zkušených instruktorů, 79 procent z nich tuto iluzi prodělalo [16]. O nebezpečnosti této iluze vypovídají i nehody, které se dříve staly (viz podkapitola 1.2.1).

Při vizuálním přiblížení ve dne a v dobrých vizuálních podmínkách, provádí pilot sestup tak, že využívá vnímání hloubky na základě vizuálních podnětů pro odhad výšky. V tomto případě je tedy relativně snadné udržet správný sestupový úhel. Jádro problému spočívá při provádění vizuálního přiblížení v noci nebo bez dostačujících či zcela chybějících vizuálních podnětů. To je dáno tím, že v takových případech pilot nemůže vnímat hloubku, vzhledem k nedostatečným vizuálním podnětům, a to je i důvod, proč se ztěžuje odhad vzdálenosti a výšky [17]. Jednoduchým znázorněním takové situace je ilustrace, viz 1.10, která znázorňuje nedostatečné vizuální reference v prostředí, kde není možné vizuální podněty získat z terénu pod letadlem a k dispozici není ani přirozený horizont, který by mohl přispět k lepší orientaci v prostoru.



(a) Prostředí bez viditelného horizontu a vizuálních referencí. (b) Stejný obrázek s viditelným horizontem zvyšující povědomí o orientaci dráhy.

Obrázek 1.10: Porovnání nočních přiblížení s prostředím typickým pro černou díru se skrytým a viditelným horizontem.

### 1.2.1 Incidenty a nehody

O nebezpečnosti iluze černé díry vypovídají i nehody, které se dříve staly. Mezi roky 1965 a 1966 došlo k sérii čtyřech nehod týkajících se letadel Boeing 727.

První nehodou byl let United Airlines číslo 389 z letiště LaGuardia, New York do O'Hare International Airport, Chicago. Letadlo započalo v noci kontinuální klesání z výšky 22 000 ft a poté skončilo nárazem do Michiganského jezera [18].

Zhruba o měsíc později došlo k další nehodě. Jednalo se o let American Airlines číslo 383 z New Yorku do Cincinnati. Klesání probíhalo již v noci přes relativně tmavou oblast obchodní čtvrti Cincinnati, poté přes temné břehy řeky Ohio až k strmému jižnímu břehu, na jehož vrcholu byl začátek dráhy 18. Letadlo však narazilo do země ve výšce zhruba 12 ft pod nadmořskou výškou prahu dráhy [19].

Třetí nehoda se odehrála v roce 1966, kdy letadlo společnosti United Airlines provedlo příliš prudké klesání a přistálo před samotnou dráhou. Toto přiblížení se odehrávalo opět přes temnou oblast pouze s viditelnými světly dráhy a světly města Salt Lake City za dráhou [20].

Další nehoda se odehrála v Japonsku. Let číslo 60 provozovaný All Nippon Airways z letiště New Chitose do Tokia prováděl noční přiblížení. Let však skončil nárazem do vody v Tokijském zálivu zhruba 10 km od cílového letiště [21].





Analýza těchto čtyř nehod odhalila vzorec společných faktorů. V každém případě byly lety prováděny za dobrých meteorologických podmínek a navíc podle pravidel letu za viditelnosti. Další společný faktor je fakt, že neexistuje jediná indikace možnosti, že by výškoměry zmíněných letadel ukazovaly špatně. Ve všech případech letěli piloti až příliš nízko, což s ohledem na skutečnost, že nemuseli sledovat výškoměry, naznačuje, že se spoléhali na vizuální podněty mimo kokpit letadla. Ty je však ve výsledku svedly do nebezpečně nízké výšky [1]. Pokud by se piloti řídili pravidly letu podle přístrojů nebo by častěji sledovali přístroje, je nepravděpodobné, že by došlo k některé z těchto nehod. Analýza tedy ukazuje, že příčinou těchto nehod byla chyba ve vnímání prostoru, tedy vizuální iluze.

Další analýza odhalila, že všechny nehody se staly v noci a že letadla při přiblížování k letišťům letěla nad temnou oblastí, ať už nad vodou nebo nad neosvětlenou zemí. Dále byla ve všech případech viditelná světla v dálce.

Jedna z prvních závěrečných zpráv, která použila termín *Black hole illusion* se týkala nehody letadla Panam American World Airways v roce 1974, které provádělo ILS přiblížení na dráhu 05. Let však skončil nárazem do země 3365 ft před dráhou v Pago Pago International Airport in American Samoa [22].

Další, novodobější nehoda, která byla zapříčiněna iluzí černé díry byla v roce 2016. Došlo k nehodě turbovrtulového letounu Beechcraft 65-A90-1. Letoun prováděl noční vizuální přiblížení na domovském letišti, v poloze base leg přetočil žádaný kurs na středovou čáru dráhy a poté došlo ke kolizi s 80 ft vysokými stožáry vedení vysokého napětí s následným nárazem do země [23]. Ačkoli byli piloti velmi zkušenými, došlo k podlehnutí iluzi černé díry a klesání pod bezpečnou sestupovou rovinu. Z výše uvedeného vyplývá, že je velmi důležité, aby piloti efektivně monitorovaly přístroje, aby zabezpečili, že hodnoty týkající se rychlosti, vzdálenosti a výšky jsou v souladu s normálním přiblížením.

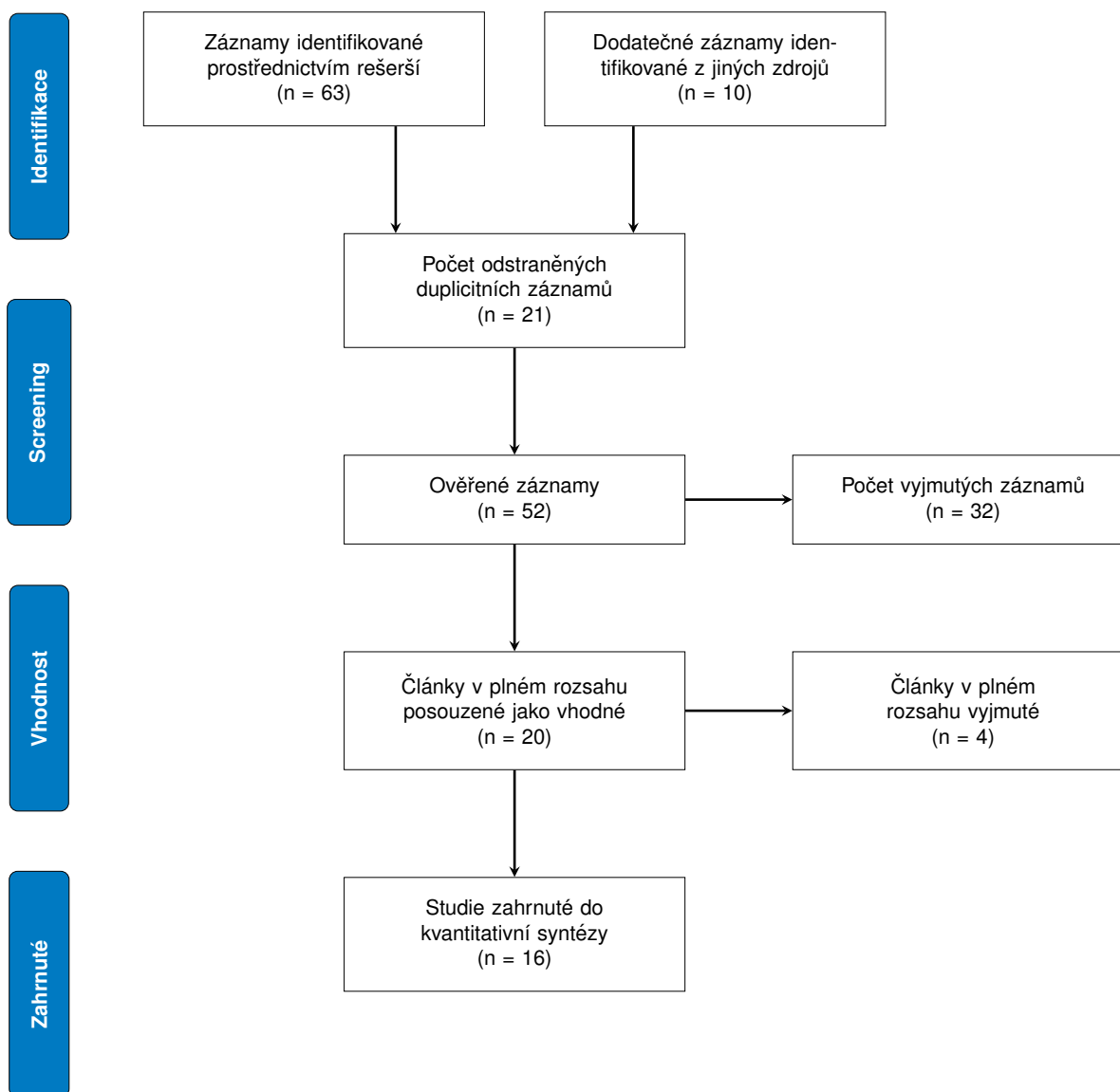
### 1.2.2 Analýza současného stavu

Dosud existuje mnoho vysvětlení, proč mají piloti při podmínkách iluze černé díry tendenci klesat více. Proto je v následující části textu vypracována analýza současného stavu. Pro účely analýzy současného stavu je v této části práce užito systematické rešerše PRISMA, která umožňuje kvantifikaci dosavadního výzkumu v souvislosti s analyzovaným tématem [24]. Analyzované články



byly shromážděny z elektronických citačních databází SCOPUS a WOS a případně z citovaných referencí. Zaměření bylo primárně na metody, které byly schopny odhalit iluzi, tedy experimentální studie. Výběr článků pro účely do zahrnutí do této práce byl realizován na základě kvality, dostupnosti a primárního fokusu na leteckou problematiku.

Průběh selekce studií týkajících se iluze černé díry je zobrazen na vývojovém diagramu 1.11. Články byly hledány na základě klíčových slov *Black Hole Illusion* ve jmenovaných elektronických citačních databázích a knižních referencí. Celkem bylo nalezeno 73 článků, ale většina z nich musela být zamítnuta proto, že část byly pouze duplikáty, netýkaly se relevantního tématu, nebyly v angličtině, nebo to byly pouze rešeršní práce. Ani počet potenciálních článků pro zahrnutí nebyl konečný, jelikož například metodika zkoumání nebyla vhodná. Konečný počet článků, které byly zahrnuty do práce je vidět v posledním bloku. Tyto články jsou porobně popsány v části níže.



Obrázek 1.11: Vývojový diagram systematické rešerše PRISMA.



Rok	Název	Autorství	Metodika & Cíl experimentu	Závěr
1978	A Psychophysical Contribution to Air Safety: Simulator Studies of Visual Illusions in Night Visual Approaches	C. L. Kraft [1]	Studie vlivu topografie a úrovně osvětlení na noční vizuální přiblížení v simulátoru B727 s venkovní simulací vzorů osvětlení simulující městskou zástavbu a dráhový systém.	Při provádění vizuálních přiblížení v noci piloti k posouzení výšky spoléhají na relativně neměnný vizuální úhel dle světelných vzorů. Tento způsob je adekvátní, když je terén plochý a odhady výšek jsou adekvátní. Pokud se jedná ale o přiblížení a stoupající terén, piloti postupují stejně, jako u plochého terénu, což má za následek, že nadhodnotí svoji výšku a upraví úhel sestupu.
1979	Pilot performance during simulated approaches and landings made with various computer-generated visual glidepath indicators	M. F. Lewis a kol. [25]	Studie zhodnotila výkon pilotů při simulovaném přiblížení s použitím 4 různých přibližovacích světelných systémů, které se v tehdejší době (konec 70. let) rozvíjely. Byly to systémy 2 příčkové VASI, 3 příčkové VASI, PAPI, T-VASIS a též let bez použití světla.	Všechny vizuální indikátory sestupové roviny výrazně snížily odchylky od ideálního sklonu 3 °. Nejlepších výsledků dosahoval systém T-VASIS s o něco nižším výkonem je 3 příčkové VASI, poté PAPI a z použitých systému měla nejnižší užitek nejjednodušší konfigurace, tedy 2 příčkový VASI. Přiblížení bez světelných indikátorů roviny, kdy jediným zdrojem informací o vertikálním vedení byla světla dráhy byla oproti předešlým sestupům signifikantně nižší a extrémně variabilní.
1979	Runway image shape as a cue for judgment of approach angle	H.W. Mertens [2]	Zjištění vlivu tvaru obrazu dráhy jako způsob hodnocení úhlu přiblížení v prostředí typickém pro iluzi černé díry.	Účastníci měli tendenci nadhodnocovat poměry stran obrazu dráhy a úhly přiblížení menší než 3°. Studie nepodporuje myšlenku, že posuzování poměru stran dráhy je užitečná pomůcka při výběru úhlu přiblížení.



1981	Perception of runway image shape and approach angle magnitude by pilots in simulated night landing approaches	H. W. Mertens [26]	Studie zkoumala vnímání tvaru dráhy a velikosti sestupového úhlu během simulovaných nočních přiblížení. Jedním ze způsobu pro vizuální posouzení sestupového úhlu je považován poměr stran obrazu dráhy (form ratio). Form ratio je definován jako poměr vertikální výšky dráhy šíří vzdáleného konce dráhy. Schopnost pilotů posuzovat form ratios byla porovnána se schopností posuzovat úhly sestupu při nočních black hole přiblíženích ve dvou experimentech.	Reakce na staticky a dynamicky simulované přiblížení indikovaly, že zde byla tendence nadhodnocení poměru tvaru dráhy a úhlů přiblížení menších než 3°. Výsledky nepodporovaly přínos posuzování form ratio jako pomůcku pro odhad úhlu přiblížení (PAD). Výsledky se také přidávají k empirickým důkazům vizuálních iluzí a jak nebezpečné je spoléhat se na vizuální posuzování sestupového úhlu v noci, když jsou viditelná pouze světla dráhy.
1982	Effects of approach lighting and variation in visible runway length on perception of approach angle in simulated night landings	H.W. Mertens a kol. [27]	Hodnocení vlivu přiblížovacích soustav a změny viditelné délky dráhy na vnímání úhlu přiblížení (PAD) při simulovaném nočním přistání.	Průměrné letěné úhly přiblížení pro všechny subjekty byly 2,13° bez světelné přiblížovací soustavy a 1,9degree se zapnutým ALS, což bylo méně než je správný úhel sestupu. Zkrácení viditelné délky otočením světel vzdálenější poloviny vedlo ke zvýšení průměrných generovaných úhlů přiblížení z 2,2° na 2,7°. Přítomnost stejné intenzity přiblížovacích světel nebo zvýšená intenzita přiblížovacích světel neměla na vertikální trajektorii významný vliv.
1983	Visual Slant Misperception and the "Black-Hole" Landing Situation	John A. Perrone [28]	Autor jako data použil trajektorie 40 pilotů z experimentu, který realizoval H.W. Mertens a jeho tým. Cílem bylo potvrdit korelaci mezi hypotézou autora a daty naměřenými v předešlých experimentech.	Predikce pomocí autorem sestaveného vzorce upraveného pro odhad úhlu sestupu v noci korelovala s daty aplikovanými z předešlých studií. Piloti měli v podmínkách BHI tendenci upravovat úhel sestupu, tak aby byla dosažen vnímaný úhel sestupu 3°. Toto však mělo za následek, že subjekt letěl po trajektorii přibližně 2°.
1991	Scene Content and Runway Breadth Effects on Simulated Landing Approaches	G. Lintern a kol. [29]	Hodnocení vlivu obsahu scény a šířky dráhy na simulovaná přiblížení.	Přiblížení byla nižší, protože obsah scény byl redukován jen na úzkou přistávací dráhu. Variabilita mezi jednotlivými pokusy byla vyšší, protože obsah scény byl redukován a tím snížen tok vizuálních informací.



2004	Evaluation of a Spatial Disorientation Simulator Training for Jet Pilots	K. W. Kallus a kol. [30]	26 pilotů podstoupilo měření na pohyblivém simulátoru iluzí DISO. Měření bylo zaměřeno na sledování fyziologických parametrů během jednotlivých fází scénáře a porovnání 3 skupin, které obdržely různé úrovně briefingu a tréninku.	Výsledky ukázaly velký vliv iluze černé díry na výkyvy fyziologických parametrů z EKG, což značí vysoké zatížení v těchto podmínkách letu. Dále bylo zaznamenáno, že výkon letců, kteří obdrželi výcvik přímo na konkrétní iluze byl znatelně lepší než pro skupinu, která prošla pouze teoretickou přípravou a seznámením se simulátorem.
2008	Visual Misperception in Aviation: Glide Path Performance in a Black Hole Environment	R. Gibb a kol. [31]	Primárním cílem bylo porovnat efektivitu různých vizuálních podnětů (objekty na zemi, standardní ALS a konfigurovatelný ALS) pro redukci nadhodnocení sestupové roviny.	Pro případ dlouhé a úzké dráhy vyústily výkony pilota mezi 8.3 km a 0.9 km od dráhy v konkrétní přiblížení. Přidání náhodných objektů kolem dráhy nezpůsobilo zlepšení přesnosti pilota v dodržení sestupové roviny. Nováčci měli stabilnější přiblížení než zkušenější piloti.
2009	A peripherally located virtual instrument landing display affords more precise control of approach path during simulated landings than traditional instrument landing displays.	N. K. Bulkley a kol. [32]	Porovnání přesnosti přiblížení použitím různých druhů headup displayů promítáním letů.	Bylo zjištěno, že sestupové roviny zalétnuté účastníky měli tendenci začínat příliš vysoko - obecně nezačali klesat dřív než 50 s po startu, i když byly předem briefováni, že mají začít klesa okamžitě. Tento experiment ukazuje, že nepiloti se mohou naučit na zjednodušeném simulátoru a jsou ovlivněni iluzí černé díry a létají podobné sestupové roviny, jako piloti. V závislosti na jednotlivé typy displejů, oba dva ILS displeje zlepšily přesnost v porovnání s MIL-STD Cruise Mode, a že periferně umístěný virtuální ILS HUD poskytl největší přesnost.
2010	The "black hole" night visual approach: Calculated approach paths resulting from flying a constant visual vertical angle to level and upslope runways	R. Thompson a kol. [33]	C. Výpočet trajektorií přiblížení vycházejících z letu s konstantním vizuálním úhlem na dráhu s nulovým sklonem dráhu a na dráhu do kopce.	Dodržování konstantního vizuálního úhlu nemůže způsobit náraz do země ve vzdálenosti několik NM před letištem u level dráhy. Náraz do země může nastat pouze v případě dráhy do kopce.



2013	Effects of Lighting and Distraction on the Black Hole Illusion in Visual Approaches	C. M. Nicholson a kol. [34]	Studie se dobrovolně zúčastnilo 30 účastníků (16 žen, 14 mužů). Metoda spočívala ve vytvoření šesti nahraných videí ze simulace Flight Simulator X a předložení účastníkům. Tři videa byla za dne a zbylá tři situována do noci. Byly zaznamenány odhady vzdáleností účastníků během dívání se na videa a poté porovnány se skutečnou vzdáleností.	Vzdálenost v noci byla výrazně podhodnocena a vzdálenost ve dne nadhodnocena. Studie podpořila myšlenku, že osvětlení hraje značnou roli v přesnosti odhadu vzdálenosti, a že iluze černé díry může být jako důsledek narušení optického toku, který je nedostatečný v noci.
2018	Eye position affects flight altitude in visual approach to landing independent of level of expertise of pilot	D. M. Jacobs a kol. [35]	Práce se zabývá vlivem polohy očí v pilotní kabině na výšku letu během konečného přiblížení za podmínek VMC. Tři skupiny účastníků s různou úrovní zkušeností (začátečníci, kadeti ve výcviku a certifikovaní piloti) dostaly k dispozici laptop s letovým simulátorem a byly požádány, aby při přistání udržovaly sestup 3,71 °. Každý ze 32 účastníků provedl 40 vizuálních přiblížení na dráhu. Během 8 z těchto přiblížení se zorný úhel, který letový simulátor používal k výpočtu vizuální scény, pomalu zvedal nebo snižoval o 4 cm vzhledem k pilotní kabině, a tudíž se projekce viditelné části pilotní kabiny ve viditelné scéně sotva zřetelně posouvala dolů nebo nahoru.	Zvyšování a snižování simulované výšky očí vedlo u všech tří skupin účastníků ke zvyšování a snižování výšky přibližovacích trajektorií. Na základě těchto výsledků se tvrdí, že poloha očí pilotů při vizuálním přiblížení je faktorem, který přispívá k riziku nehody s černou dírou.
2020	A Comparative Evaluation of Hypotheses to Explain the Black Hole Illusion	F. Eric Robinson a kol. [36]	Studie měla za cíl porovnat několik v minulosti zveřejněných hypotéz k vysvětlení příčinnosti výskytu iluze černé díry.	Studie neprokázala zřetelné snížení celkové přesnosti pilotáže při letech v noci oproti letům ve dne. Účastníci měli tendenci sestupovou rovinu podklesávat v noci a ve dne se naopak drželi nad ideální 3° rovinou. V minulosti stanovená hypotéza o udržování konstantního zorného úhlu a letu po kružnici potvrzena nebyla. Studie naopak podpořila poznatek o citelnějším projevu iluze pro delší dráhy spolu s počáteční polohou pod sestupovou rovinou.

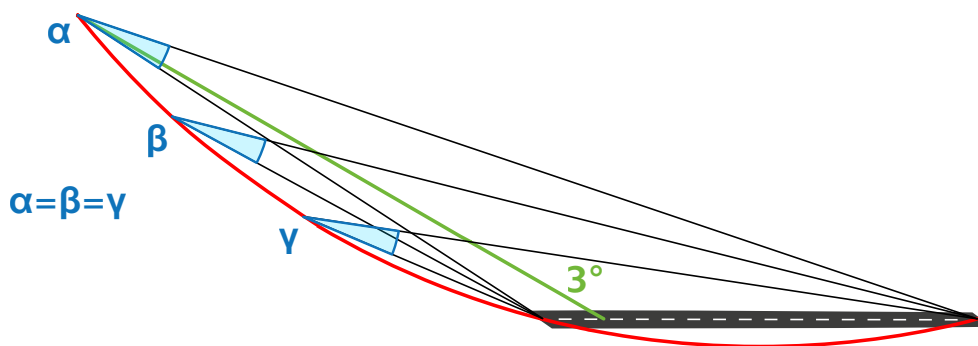


- 2020 Preliminary Support for the Line Bias Illusion as a Contributor to Black Hole Effects
- F. Eric Robinson a kol. [37]
- Cílem bylo posoudit průsečík tečkovaných čar na obrazovce počítače. V první části měření měli účastníci za úkol umístit horizontální linii tam, kde se domnívali, že by se měly protínat již zmíněné tečkované čáry. V druhé části experimentu bylo úkolem odhalit průsečík jednotlivých segmentů tečkované čáry se samostatnou plnou čarou.
- Účastníci měli v prvním měření tendenci umístit průsečík dvou sbíhajících se čar příliš nízko na obrazovku počítače. V druhém měření měli tendenci reagovat tak, jako by linie byly více horizontální, než ve skutečnosti byly prezentovány. Zjištění jsou v souladu s hypotézou, že piloti špatně odhadují umístění implicitního horizontu na základě okrajových světél dráhy.



### 1.2.3 Základní hypotézy příčinnosti

Podstata tohoto problému je nejspíše ta, že piloti provádějící přiblížení přes černou díru, nemají tendenci měnit jejich profil přiblížení vzhledem k perspektivě dráhy, jak tomu obvykle bývá při normálních konvenčních přímých přiblíženích. Místo toho provádí přiblížení tak, že neúmyslně udržují konstantní vizuální úhel. Matematickým vyjádřením neměnného vizuálního úhlu je oblouk kružnice [1]. To je graficky zobrazeno na obrázku 1.12. Při letu po takovém oblouku se však letadlo dostává pod ideální sestupovou rovinu a navíc, pokud je průměr této kružnice dostatečně velký, pilot nebude mít možnost detekovat, že letí po oblouku a ne po přímce [17].



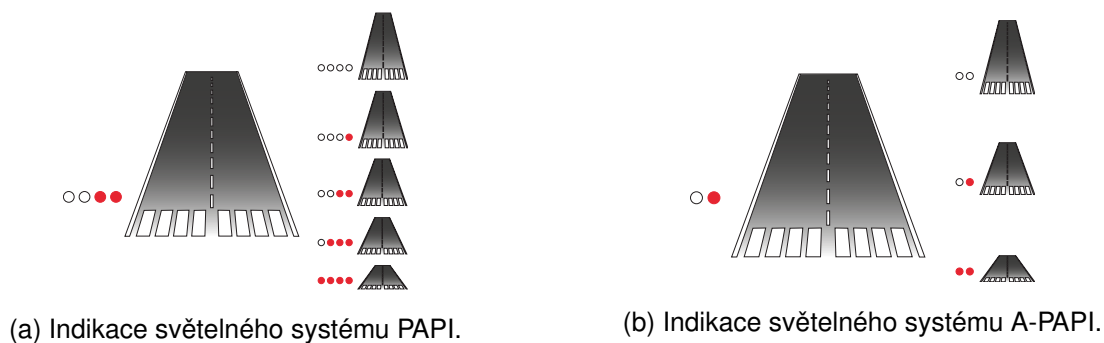
Obrázek 1.12: Průběh přiblížení na dráhu při udržování konstantního vizuálního úhlu

Dalším vysvětlením, proč může tato iluze nastat je to, že absence pozemních podnětů, právě u přiblížení přes vodní plochu, či neosvětlenou plochu, může mít za následek vytvoření iluze větší výšky. Proto pak má pilot, který podlehl iluzi, nižší přiblížení [38].

Dále může být problém v dráhovém osvětlení, jelikož se osvětlená dráha jeví pilotovi blíže a pilot může začít dříve klesat. To může být jednoduše demonstrováno změnou intenzity osvětlení. Při ztlumení světél dochází k ploššímu přiblížení, a naopak větší jas světél má za následek strmé přiblížení [17].

Jak je tedy vidět, vizuální přiblížení má svá vlastní rizika i přesto, že je vizuální přiblížení prvním typem přiblížení, který se žáci v pilotním výcviku učí. Při výběru vizuálního přiblížení před přístrojovým by se měly zvážít všechny faktory a rizika. Nejlepším způsobem, jak se vyhnout této iluzi, je vyvarovat se dlouhým přímým přiblížením v noci nad nevýrazným a neosvětleným terénem. Místo toho je lepší udržovat bezpečnou výšku až do blízkosti letiště a poté klesat standardním okruhem. Další pomůckou může být použití přístrojových přiblížení, nebo DME pro stanovení

profilu bezpečného priblížení. Jiný, zaručený způsob, je použití světelného systému PAPI, nebo A-PAPI, pokud je k dispozici. Tyto světelné systémy umožňují okamžitou indikaci sestupové roviny (viz obrázek 1.13). V případě odchylek od ideální sestupové roviny je tak pilot schopen provést opravy v závislosti na poskytované barevné informaci. Je také velmi důležité pečlivě sledovat letové přístroje, a to zejména výškoměr, variometr a rychloměr, na kterém můžeme zaznamenat neobvykle vyšší rychlostí sestupu [39]



Obrázek 1.13: Indikace jednotlivých světelných systémů.

Dle Perroneho [28] byla stanovena alternativní hypotéza k příčinnosti nesprávného posuzování polohy, tedy vnímaného úhlu sestupu (PAD). Dle publikace využívající data z předešlých měření, která realizoval H.W. Mertens a jeho tým [40] byl aplikován vzorec 1.1 pro lety ve dne a upravený vzorec 1.2 pro lety v noci, který pracuje i se šíří dráhy. Presentovaná data korelovala s nadhodnocováním úhlu sestupu (GPO – glide path overestimation), kdy při 3° sestupu je vnímán úhel necelých 6°. Pilot poté provádí korekci až po okamžik, kdy se PAD rovná 3°, což však dle vzorce 1.2 odpovídá skutečným 2,1° což může být v jistých situacích nebezpečné nízko [28].

$$\tan \alpha = \frac{L \cdot \sin \theta}{D + L \cdot \cos \theta} \quad (1.1)$$

kde  $\alpha$  je vnímaný úhel sestupu,  $L$  představuje délku dráhy od záměrného bodu ke konci dráhy,  $\theta$  představuje skutečný úhel sestupu a  $D$  je vzdálenost od letadla k záměrnému bodu [28].

$$\tan \beta = \frac{2DL \cdot \sin \theta \cdot \tan \theta}{W(D + L \cdot \cos \theta)} \quad (1.2)$$



kde  $\beta$  je vnímaný úhel sestupu,  $L$  představuje délku dráhy od záměrného bodu ke konci dráhy,  $\theta$  představuje skutečný úhel sestupu,  $D$  je vzdálenost od letadla k záměrnému bodu a  $W$  je šíře osvětlené dráhy [28].



## 2 Metody

Kapitola uvádí kompletní popis realizovaného experimentu spolu s použitými metodami předzpracování a zpracování dat.

### 2.1 Scénář experimentu

Pro experimentální ověření příčinnosti iluze černé díry byly vytvořeny speciální letové profily, během kterých byla měření prováděna. Jednalo se o čtyři vizuální přiblížení v následujícím pořadí:

- Přiblížení ve dne bez PAPI světel
- Přiblížení v noci bez PAPI světel
- Přiblížení v noci s PAPI světly
- Přiblížení v noci bez PAPI světel

Taková následnost jednotlivých přiblížení byla zvolena pro možnost porovnat schopnost udržovat ideální rovinu sestupu při rozličných podmínkách a rozdílných vizuálních podnětech, které jsou v daných podmínkách k dispozici.

Při prvním měřeném letu, který proběhl za dne ve VMC byla deaktivována světelná soustava sestupové roviny PAPI, měřené subjekty tedy měly vizuální reference vůči zemi a mohly tak lépe odhadovat svou výšku, nicméně vůči dráze svou polohu mohly korigovat jen dle vnímání tvaru dráhy a celkové perspektivy. Dle Gibba [41] a teorie orientované na terén, by tedy měl být zajištěn dostatek vizuálních referencí a umožněna orientace a odhad sestupové roviny pomocí perspektivy [28].

Druhý vykonaný sestup již byl zasazen do podmínek simulujících podmínky iluze černé díry. PAPI systém byl tedy opět neaktivní a let byl zasazen do bezměsíčné noci, kdy jediným signifikantním prvkem byl dráhový systém.

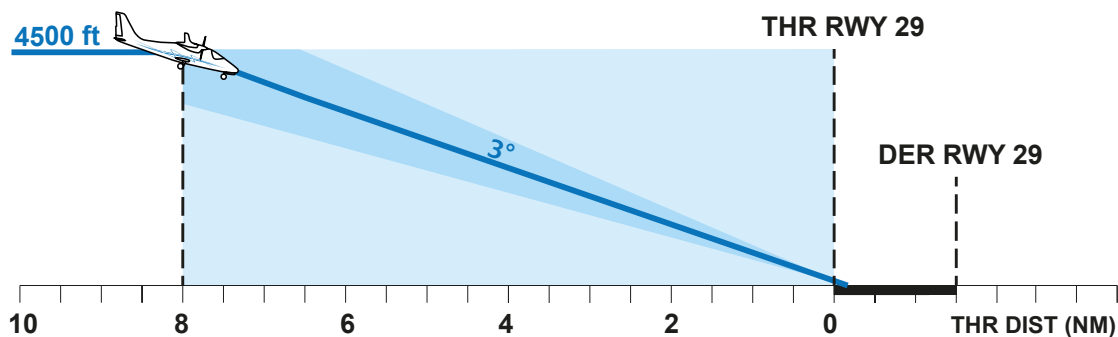
Veškerá přiblížení probíhala na dráhu 29 na letišti LKKV – Karlovy Vary. Toto letiště bylo vybráno proto, jelikož disponuje typickými podmínkami pro přiblížení přes černou díru. Výběr daného letiště proběhl empiricky na základě reálných zkušeností z provozu. Pro zajištění co nejpřesnější simulace podmínek typických pro danou iluzi byly navíc manuálně ze scenerie odňaty dva světelné letištní majáky (reflektory) nesouvisející s charakterem práce. V softwaru

umožňujícím modifikaci scénérie byl upraven též i dráhový systém ve smyslu odstranění světelné přiblížovací soustavy (ALS) dráhy 29. Konečná podoba přiblížení na dráhu 29 je graficky zobrazena na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: Vizualní zobrazení upravené scénérie použité při přiblíženích na dráhu 29 na letišti LKKV.

Před samotným měřením měl subjekt prostor na volný let během kterého prováděl pilotáž za účelem seznámení se simulátorem a letovými charakteristikami použitého letounu. Začátek experimentu byl nastaven ve výšce 4500 ft ve vzdálenosti 8 NM od dráhy 29 na rychlosti 110 kt. Subjekt měl za úkol zaletět vizuální přiblížení z této polohy se snahou udržet  $3^\circ$  úhel klesání dle subjektivního úsudku. Profil letu je graficky ilustrován na obrázku 2.2.



Obrázek 2.2: Schématický náčrt měřeného sestupu na RWY 29 v LKKV. Letěný úsek je vyznačen světle modrým podkladem.

Po zalétnutí všech čtyř měřených přiblížení měli účastníci za úkol vyplnit dotazník k zjištění demografických údajů a subjektivního hodnocení experimentu.

Veškeré lety byly prováděny na letounu Beechcraft Baron s analogovými palubními přístroji. Výhoda tohoto typu zobrazení informací spočívá v hodnocení rozdělení pozornosti, jelikož je jednodušší určit, který přístroj pilot sleduje. Palubní deska letounu Beechcraft Baron je spolu s výhledem z kabiny zobrazena na obrázku 2.3. Konfigurace letounu byla ponechána na vlastní uvážení účastníka. Jednotlivé přiblížení bylo zakončeno přistáním na dráhu 29.



Obrázek 2.3: Palubní deska letounu Beechcraft Baron.

## 2.2 Letový simulátor

Experimentální část této práce byla provedena na Biofeedback VR simulátoru na Ústavu letecké dopravy, ČVUT. Ten je zobrazen na obrázku 2.4. Jedná se o simulátor, který sestává z primárních ovládacích prvků, kvadrantu pro ovládání směsi, přípusti a vrtule a polohovatelného sedala pilota. Tento simulátor umožňuje provádět základní prvky pilotáže ze strany účastníka. V případě potřeby mohou být pokročilejší funkce ovládány z obslužného pracoviště na vyžádání.

K ovládání letadla na zmíněném simulátoru byl konkrétně využit Logitech pro flight yoke systém sestávající z ručního řízení v podobě sloupku řízení, plynového kvadrantu a nožního řízení v



Obrázek 2.4: Biofeedback VR simulátor Laboratoře lidského činitele ČVUT.



(a) Ovládací berany a plynový kvadrant Logitech pro flight yoke.



(b) Nožní řízení VR simulátoru Logitech rudder pedals.

Obrázek 2.5: Systémy používané k ovládání letadla na simulátoru.

podobě pedálů s funkcí směrového řízení i brzdění podvozkových kol. Sestava ovládacích prvků je ilustrována na obrázku 2.5. Rozmístění jednotlivých částí simulátoru z velké části odpovídalo skutečnému rozmístění v letadle.

Softwarové řešení zajišťující simulaci a zobrazení zvoleného letového profilu bylo zajištěno pomocí programu X-plane 11 Flight Simulator (Laminar Research Ltd., Columbia, South Carolina, USA). Výhoda zvoleného softwaru je, že umožňuje zaznamenávat letová data.

Z charakteru práce a pro zajištění maximální věrohodnosti bylo zvoleno zobrazení dané letové situace pomocí prostředí virtuální reality. To bylo umožněno na základě VR headsetu FOVE (FOVE Inc., Tokyo, Japan) se schopností nejen zobrazovat situaci, ale i zaznamenávat pohyb zorného pole a vizuálního fokusu, tj. centra pozornosti ve virtuální realitě. Na snímání náklonu, polohy, sklonu a natočení hlavy je k headsetu navíc snímač a kamera, která tyto výchylky snímá. Zvolený model VR headsetu je zobrazen na obrázku 2.6. Váha celého headsetu je 520 g a k jeho upevnění slouží popruhy se suchým zipem [42].



Obrázek 2.6: FOVE headset virtuální reality.

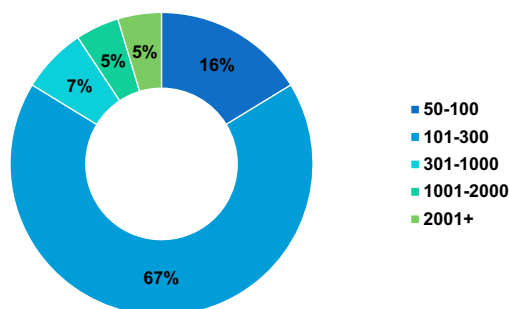
Parametry VR headsetu FOVE jsou následující [42]:

- obnovovací frekvence obrazu: 70 Hz
- zorné pole: 90-100°
- Senzor snímání pohybu očí: 120 fps infračervený tracking systém x2 s přesností méně než 1 °
- Rozhraní: HDMI 1.4 / USB 3.0 / USB 2.0
- Příslušenství: sledovací kamera (stanice), pěnové výplně

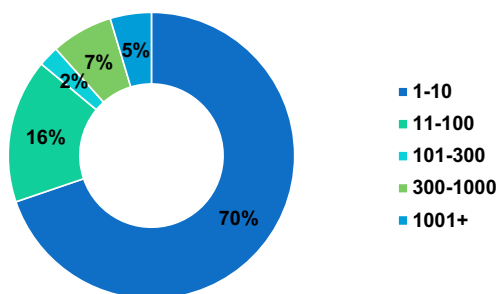


## 2.3 Subjekty

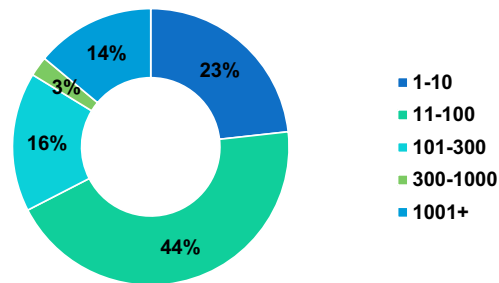
Výzkumný vzorek pro praktickou část práce se skládal z pilotů. Celkem 48 subjektů se na dobrovolné bázi účastnilo této studie. Jednalo se konkrétně o piloty a pilotky jak ve výcviku, tak absolventy i aktivně létající zkušené piloty. Piloti byli ve věkovém rozmezí od 18 do 65 let. Vzhledem k tomu, že byli všichni držitelé zdravotní způsobilosti první a druhé třídy, měli normální zrakovou ostrost a jakékoliv vestibulární a zrakové poruchy byly vyloučeny. Před samotným experimentem podepsali všichni účastníci informovaný souhlas. Specifikace subjektů na základě celkového náletu, hodinového náletu v noci a hodinového náletu za letu podle přístrojů je zobrazena na obrázcích 2.7, 2.8 a 2.9.



Obrázek 2.7: Celkový hodinový nálet subjektů na letounech.



Obrázek 2.8: Hodinový nálet subjektů v noční době.



Obrázek 2.9: Hodinový nálet subjektů za letu podle přístrojů.

## 2.4 Záznam a extrakce dat

Pro vyhodnocení potřebných ukazatelů bylo důležité zajistit spolehlivý záznam dat, která jsou později využita pro hodnocení letových parametrů a analýzu rozdělení pozornosti pomocí sledování očí. Záznam dat probíhal přímo na pracovišti simulátoru, který obsahuje vestavěné moduly pro zápis letových dat a též integrované rozhraní pro zápis pozice vizuálního fokusu. Zápis dat byl podpořen vlastním softwarovým řešením, které je součástí konfigurace Biofeedback simulátoru [43].

### 2.4.1 Letová data

Záznam trajektorie a dalších letových parametrů udržovaných pilotem je v rámci simulátoru zajištěn integrálním zapisovačem dat s variabilitou zapisovaných dat. Toto umožňuje širokou škálu možných měření a prováděných experimentů. Letová data jsou zaznamenávána po celou dobu, kdy je spuštěna letová simulace.

Software simulátoru dále ukládá časová razítka pro každý vzorek dat, který je zaznamenáván s frekvencí 5 Hz. Toto je užitečné při následném předzpracování, tedy časové synchronizaci a extrakci konkrétních dat pro evaluaci experimentu. Po ukončení měření je nutné datový výstup uložit mimo původní adresář, jelikož je letový zápis při dalším spuštění simulátoru přepsán novými daty.

Datový soubor bylo nutno upravit, tak aby bylo možno s daty pracovat při aplikaci statistických ukazatelů. Za tímto účelem byl vytvořen skript v prostředí *Matlab 2022a*, který data extrahoval ze surového zápisu dat. Byly vyzvednuty pouze letové parametry užitečné při analýze konkrétního



experimentu, což byly koordináty letounu, indikovaná rychlost, časová razítka jednotlivých vzorků, DME vzdálenost a dodatečné údaje jako vertikální rychlost a záznam zásahů do řízení pro možnost dodatečného zužitkování dat. Dále tento skript provedl roztřídění letových dat na jednotlivé sestupy. Sestupy byly dále programově oříznuty, tak aby zůstal výsek od počátku sestupu po okamžik dosažení prahu dráhy 29 na letišti LKKV, který byl později analyzován. Toto bylo zajištěno vyzvednutím koordinátů prahu dráhy z letištní dokumentace a porovnáním aktuálního azimutu vůči tomuto koordinátu, pokud narostl na hodnotu více než  $90^\circ$  bylo dosaženo prahu dráhy. Toto řešení je přiloženo ve zdrojovém kódu, viz níže. Upravená data byla připravena pro další zpracování pomocí statistických metod a ukazatelů.

```
1 P = 'csv';
2 S = dir(fullfile(P, '*.txt'));
3
4 dataset = struct();
5
6 for k = 1:numel(S)
7     F = fullfile(P,S(k).name);
8     T = import_table(F);
9     T(~is_before_threshold(T.lat_deg, T.lon_deg, 50.199258, 12.928972, 289),:)=[];
10    measurings = cell(0);
11    i = 1;
12
13    while i <= height(T)
14        j = i;
15        while j < height(T)
16            if T.totl_time(j) < T.totl_time(j+1)
17                j = j+1;
18                continue
19            else
20                break
21            end
22        end
23        if j - i > 1000 & j - i < 1600
24            measurings{end+1} = T(i:j, :);
25        end
26        i = j + 1;
27    end
28    [filepath,name,ext] = fileparts(F);
29    dataset.(name) = measurings;
30 end
31
32 function ret = is_before_threshold(lat, lon, thr_lat, thr_lon, heading)
33     [~, az] = distance(lat, lon, thr_lat, thr_lon);
34
35     normDeg = mod(az-heading, 360);
36     absDiffDeg = min(360-normDeg, normDeg);
37
38     ret = abs(absDiffDeg) < 90;
39 end
```

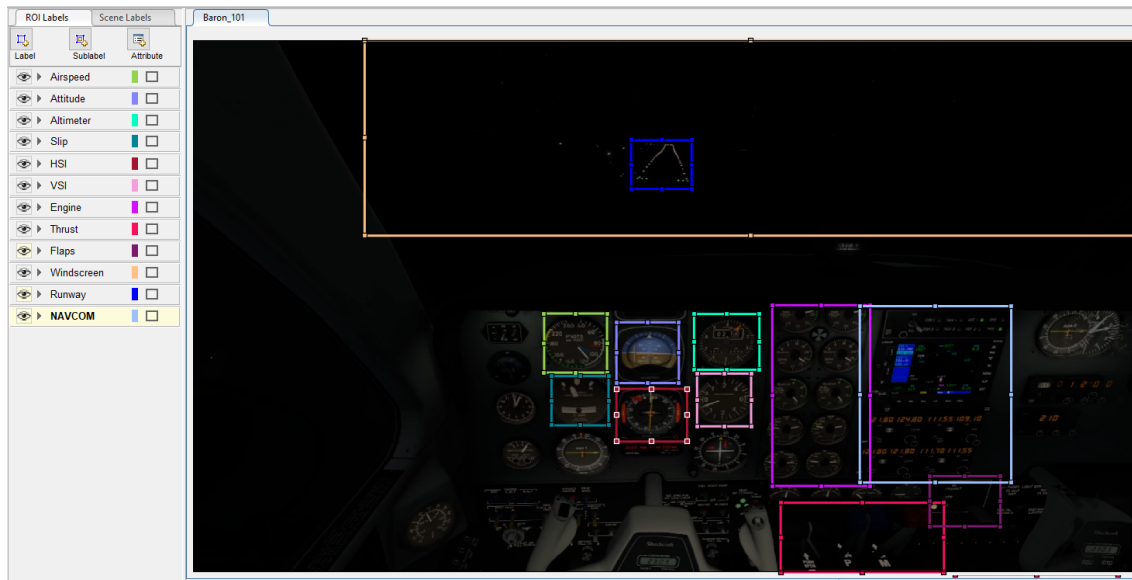


### 2.4.2 Data sledování očí

Sledování vizuálního fokusu a následná analýza rozdělení pozornosti mezi přístroje a venkovní scénu obnáší poměrně obsáhlou fázi přípravy. Data z náhlavní soupravy Fove jsou zaznamenávána pomocí utility, která je vlastním řešením Laboratoře lidského činitele. Tato aplikace využívá programové rozhraní (API - Application Programming Interface) headsetu Fove VR a zaznamenává souřadnice vizuálního fokusu. Pro kompletní sběr dat je též nutné zaznamenávat samotnou scénu simulace k čemuž rovněž slouží již zmíněná utilita, která nahrává obrazovku.

Aby bylo možné přiřazovat pohled subjektu na určitý přístroj a tím docílit povědomí o rozložení pozornosti mezi jednotlivé přístroje či skupinu přístrojů, bylo nutné vytvořit detektor objektů, který bude schopen detekovat a na každém snímku analyzované sekvence z letu označit oblast zájmu ROI (Region of interest), kde tyto oblasti představují jednotlivé přístroje, či skupiny přístrojů. Pro trénování detektoru je však třeba vytvořit sadu předurčených oblastí zájmu na širokém vzorku snímků. Konkrétně pro tuto práci bylo označeno 2100 navzorkovaných snímků, které byly získány z dodatečně letěných sestupů, kdy byla nahrávána scéna a poté programově extrahovány náhodné snímky pro trénování algoritmu. Všechny tyto snímky bylo nutno manuálně zpracovat, tedy označit požadované oblasti zájmu kterými byly. Pro samotné trénování pak jako trénovací sada byly určeny dvě třetiny sady, tedy 1400 snímků. Zbýlých 700 snímků pak bylo určeno pro verifikaci a ohodnocení kvality trénování, tato sada je označena jako „*ground truth*“, což značí, že se jedná o referenční data a detektor na této sadě určuje, zda je oproti těmto správně označeným snímkům sám schopen korektně detekovat. Ukázka tvorby zmíněného datasetu určeného pro trénování objektového detektoru s vyznačenými oblastmi zájmu ROI je uvedena na obrázku 2.10.

K vytvoření již výše zmíněného detektoru bylo využito metod strojového vidění a učení pomocí neuronových sítí v prostředí Matlab kdy bylo využito algoritmu hlubokého učení RCNN (Regions with Convolutional Neural Networks). Detekce objektů je proces vyhledávání a klasifikace objektů v obraze. Jeden z přístupů hlubokého učení, regiony s konvolučními neuronovými sítěmi, zpracovává poskytnuté pravoúhlé regiony (ROI) s funkcemi konvolučních neuronových sítí. R-CNN je dvoufázový detekční algoritmus, první fázi identifikuje podmnožinu oblastí v obraze, které by mohly obsahovat objekt. Druhá fáze klasifikuje objekt v každé oblasti. V prostředí *Matlab 2022a* byl k tomuto účelu použit algoritmus R-CNN obsažený v sadě *Computer Vision Toolbox*, kdy je



Obrázek 2.10: Ukázka tvorby datasetu určeného pro trénování objektového detektoru s vyznačenými oblastmi zájmu (ROI).

konvoluční neuronová síť aplikována na klasifikaci výřezů v rámci daného snímku, tedy již zmíněný soubor 2100 označených snímků.

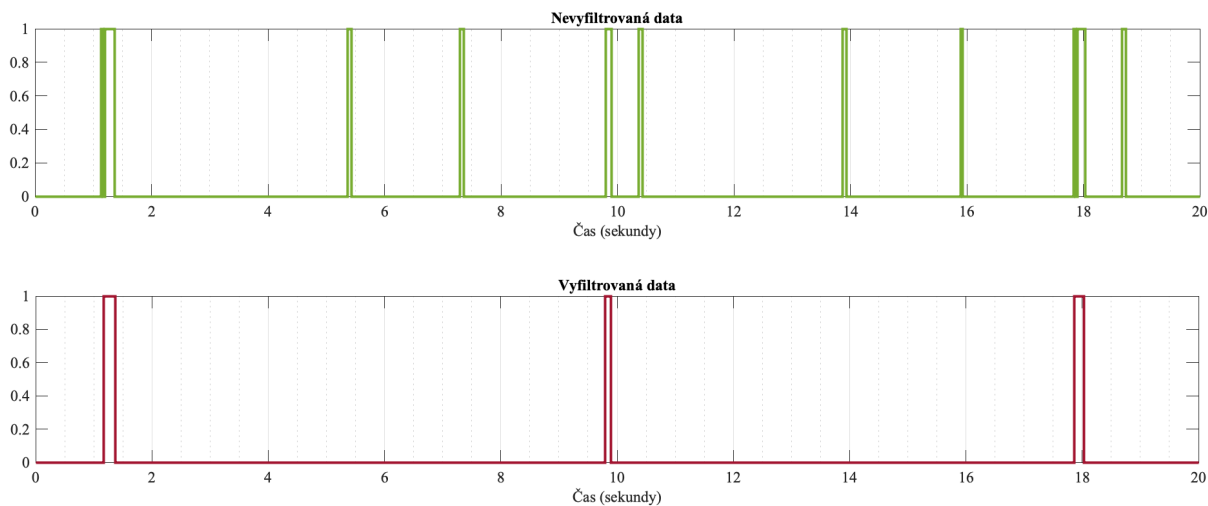
Další proces byl podpořeno vlastními řešeními Laboratoře lidského činitele, kdy proběhla modifikace zaznamenaných dat, tak aby bylo dosaženo časové synchronizace jednotlivých prvků, tedy dat sledování očí a nahrávky z kokpitu. Samotná videa byla dále modifikována ve smyslu redukce rozlišení pro optimalizaci výpočetní náročnosti, která je s detekcí objektů a strojovým učením spojená. Stěžejní součástí zpracování dat sledování očí je algoritmus pro převod zaznamenaných dat souřadnicového systému FOVE, tedy zanesení vizuálního fokusu do videa. Poté je aplikován algoritmus přiřazování převedených souřadnic k natrénovaným programem detekovaným oblastem zájmu v samotné nahrávce z experimentu, tedy zjišťování, zda v konkrétním jednotlivém snímku vizuální fokus míří do definovaných oblastí zájmu [43]. Ukázka detekovaných objektů (ROI) na videu je zobrazena na obrázku 2.11.

Výsledná data s přiřazením detekce jednotlivých přístrojů byla v poslední fázi před statistickými metodami upravena pomocí filtru dolní propusti (low pass filter), který pomohl eliminovat artefakty v zaznamenaných datech, ke kterým dochází například při přecházení mezi jednotlivými přístroji, kdy by jinak byly jako platné zaznamenané i zákmity přes ROI, na které se však subjekt nesoustředil a



Obrázek 2.11: Ukázka detekovaných objektů ve videu.

ze kterých nečerpal informace. Příklad části dat s eliminovanými zákmity je na obrázku 2.12. Tímto procesem je tak zaručeno, že v daném okamžiku bude detekována vždy jen jedna oblast zájmu což platí v případě, že jsme nedefinovali překrývající se ROI.



Obrázek 2.12: Vizualizace filtrace artefaktů způsobených krátkodobou detekcí přístrojů při skenování.



## 2.5 Statistické metody

### 2.5.1 Letová data

Pro letová data bylo vybráno několik statistických nástrojů, které umožňují hodnotit správnost a přesnost udržovaných parametrů či úhlu sestupu, který je v rámci práce analyzován. Níže jsou popsány statistické ukazatele aritmetický průměr, směrodatná odchylka a RMSE.

- Aritmetický průměr – tento statistický ukazatel je užít jak pro vyjádření průměrné vertikální odchylky, tak pro sledování udržované rychlosti pro danou část scénáře experimentu.

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (2.1)$$

kde  $N$  je počet vzorků souborů a  $x_i$  je naměřená vzorkovaná hodnota.

- Rozptyl a směrodatná odchylka – tato metrika ukazuje na charakter souboru ve smyslu přesnosti dat, tedy oscilace okolo udržovaných hodnot. V práci je užitá pro jednoduché vyjádření schopnosti udržovat letový parametr relativně přesně. Směrodatnou odchylku získáme jako druhou odmocninu rozptylu pro daný soubor dat.

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N} \quad (2.2)$$

kde  $\bar{x}$  je aritmetický průměr souboru,  $L$  představuje délku dráhy od záměrného bodu ke konci dráhy a  $x_i$  je naměřená vzorkovaná hodnota.

- RMSE – pro účely hodnocení správnosti letu mezi jednotlivými částmi profilu je užito hodnoty RMSE, která je vhodná jako ukazatel, který vzhledem k druhé mocnině v čitateli umocňuje význačné chyby. V práci je užít jak pro hodnocení vertikálního profilu letu vůči 3°, tak pro hodnocení udržování správné indikované rychlosti na přiblížení.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{y_i - x_i}{\sigma_i} \right)^2} \quad (2.3)$$

kde  $n$  je počet vzorků souboru,  $y_i$  představuje požadovanou (predikovanou) hodnotu a  $x_i$  je skutečná vzorkovaná hodnota.



### 2.5.2 Eye-tracking data

Po aplikování vhodného post-processingu hrubých dat z detektoru fokusu na příslušné přístroje, je data nutné zpracovat z pohledu principů rozdělení pozornosti v kokpitu a diverzifikace mezi primární letové přístroje a například pohledu z čelního skla směrem do simulované scény, kde se nachází dráhový systém.

Užitou metodou je procentuelní vyjádření zastoupení detekce jednotlivých přístrojů v souboru dat, tedy pro každý snímek záznamu letu od 8 NM po dosažení prahu dráhy. Takový způsob zpracování dat umožní porovnání rozdělení pozornosti a rozličenosti mezi jednotlivými lety.

### 2.5.3 Test hypotéz

Z charakteru měření vyplývá, že data pro jednotlivé lety budou závislá, a tak využijeme test pro účely komparace dat. Volba testu je závislá na dalších vlastnostech zkoumaného souboru, a tak byla na vzorku dat nejdříve otestována normalita rozdělení těchto dat. Analýza v prostředí Matlab nepotvrdila normalitu dat a tudíž je nutné uvažovat neparametrické testy.

Jako vhodný je pro tento účel Friedmanův test, který vyžaduje úplnost datového souboru. V programovém prostředí Matlab k jeho aplikaci slouží fce *friedman*. Jedná se v podstatě o variantu testu analýzy rozptylu (ANOVA). Friedmanův test je neparametrický dvoufaktorový test, který je určen pro ordinální data (dokážeme data uspořádat) a párové výběry bez předpokladu normality. Specifika Friedmanova testu spočívá v tom, že testuje shodu výběru s ohledem na jeden faktor ze dvou a vliv druhého faktoru se snaží eliminovat. Friedmanův test je blokový test, bloky jsou tedy v řádcích, výběry ve sloupcích. Nežadovaný faktor je tvořen pomocí nezávislých bloků, data v blocích nemají vazbu na jiné bloky [44].

Toto lze dobře využít v případě realizovaného experimentu, kdy analyzujeme statistické parametry mezi jednotlivými lety experimentu. Jednotlivé lety tedy budou výběry ve sloupcích a bloky (subjekty) v řádcích. Tímto je eliminován vliv různorodosti subjektů, jelikož cílem experimentu není určit závislost rozdílné úrovně zkušeností a znalostí na sklonu k podléháním iluzí. Výsledek Friedmanova neparametrického testu se určuje na hladině významnosti  $\alpha = 5\%$ . V případě zjištění p-hodnoty menší než 0.05 je vhodné aplikovat post-hoc analýzu pomocí Matlab funkce *multcompare*, která umožňuje následné vizuální porovnání statisticky významných odchylek testovaných souborů dat.





### 3 Presentace výsledků

Data získaná během letového experimentu byla zpracována a po aplikování statistických metod a exportu do grafické podoby jsou prezentována v následujících částech, které jsou rozděleny na prezentaci letových dat a příslušných statistických ukazatelů a v následné části jsou pak uvedeny metriky týkající se zpracování záznamu pohybu očí a výsledku v podobě informací o rozdělení pozornosti subjektů v průběhu jednotlivých částí experimentu.

#### 3.1 Letová data

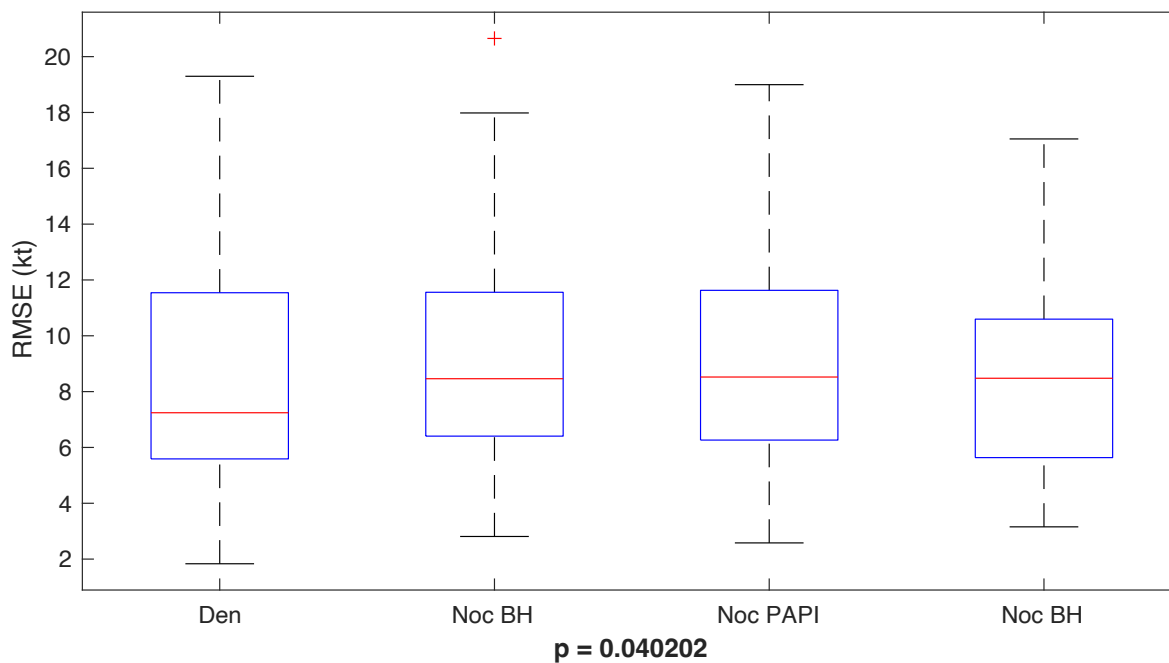
Zpracováním letových dat získaných z letového zapisovače vznikly následující metriky rozdělené dle měřeného letového parametru rychlost či vertikální profil. Uvedeny jsou grafické reprezentace dat v podobě průběhů i krabicové diagramy pro analýzu distribuce dané sledované veličiny. V případě, že statistický test ukázal na významné rozdíly v testovaném souboru dat, tedy při zjištění  $p$ -hodnoty menší než 0.05, je pod krabicovým diagramem přiložen i grafický výstup post-hoc analýzy.

##### 3.1.1 Rychlost

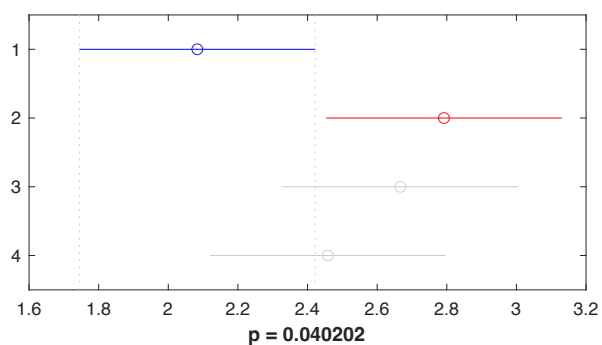
Výsledné RMSE hodnoty udržování rychlosti 110 kt, viz obrázek 3.1, ukazují na statisticky významný rozdíl správnosti při provádění scénáře 4 letů, na který ukazuje výsledná hodnota Friedmanova testu s  $p = 0.040202$ . Následná post-hoc analýza ukázala statisticky významný rozdíl pouze mezi RMSE prvního a druhého letu scénáře, tedy mezi letem za dne bez indikace PAPI oproti letu druhému v podmínkách BHI, kdy byla rychlost udržována s nejnižší správností.

Pro aritmetický průměr udržované rychlosti nebyl identifikován žádný statisticky významný rozdíl. Z boxplotu níže na obrázku 3.3 je možné vyčíst, že subjekty při všech částech profilu udržovaly průměrně o něco nižší než předepsanou rychlost s mediánem přibližně 107 kt.

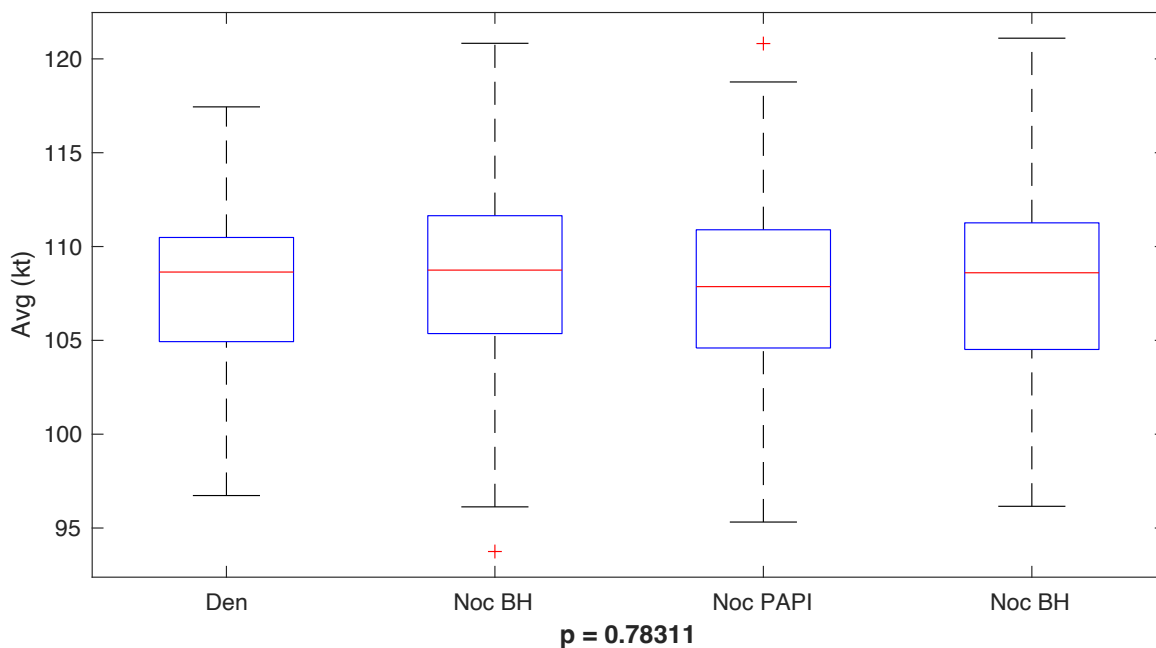
Směrodatná odchylka ukazující na případnou variabilitu (možnou oscilaci okolo předepsané rychlosti) neukazuje na významný rozdíl mezi jednotlivými lety profilu, viz obrázek 3.4. Směrodatná odchylka byla pro všechny lety určena s mediánem přibližně 6 kt.



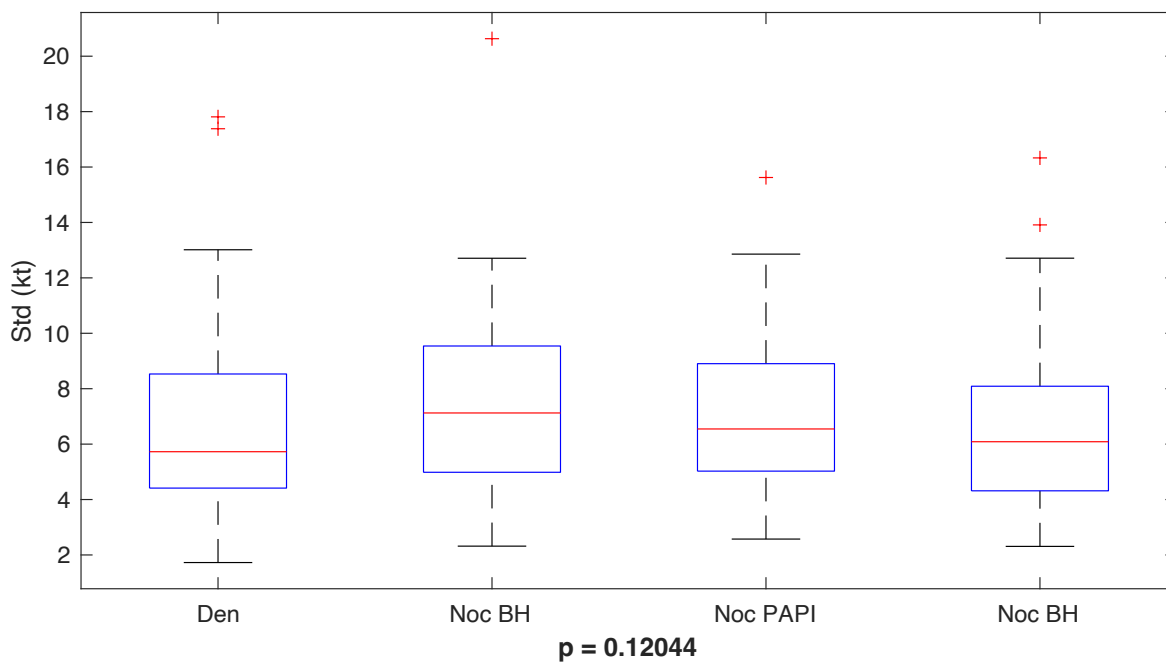
Obrázek 3.1: Distribuce naměřených hodnot RMSE rychlosti pro lety scénáře s určenou p-hodnotou (signifikantní rozdíl při  $p < 0.05$ ).



Obrázek 3.2: Post-hoc analýza RMSE rychlosti.



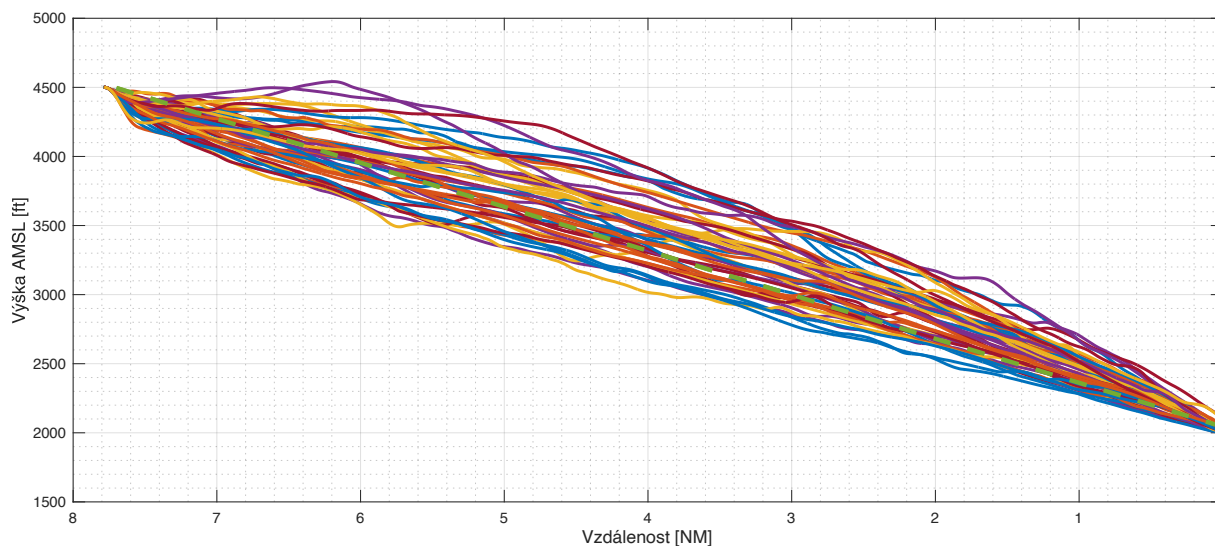
Obrázek 3.3: Distribuce průměrné rychlosti pro lety scénáře s určenou p-hodnotou (signifikantní rozdíl při  $p < 0.05$ ).



Obrázek 3.4: Distribuce směrodatné odchylky pro rychlost daného letu scénáře s určenou p-hodnotou (signifikantní rozdíl při  $p < 0.05$ .)

### 3.1.2 Vertikální profil

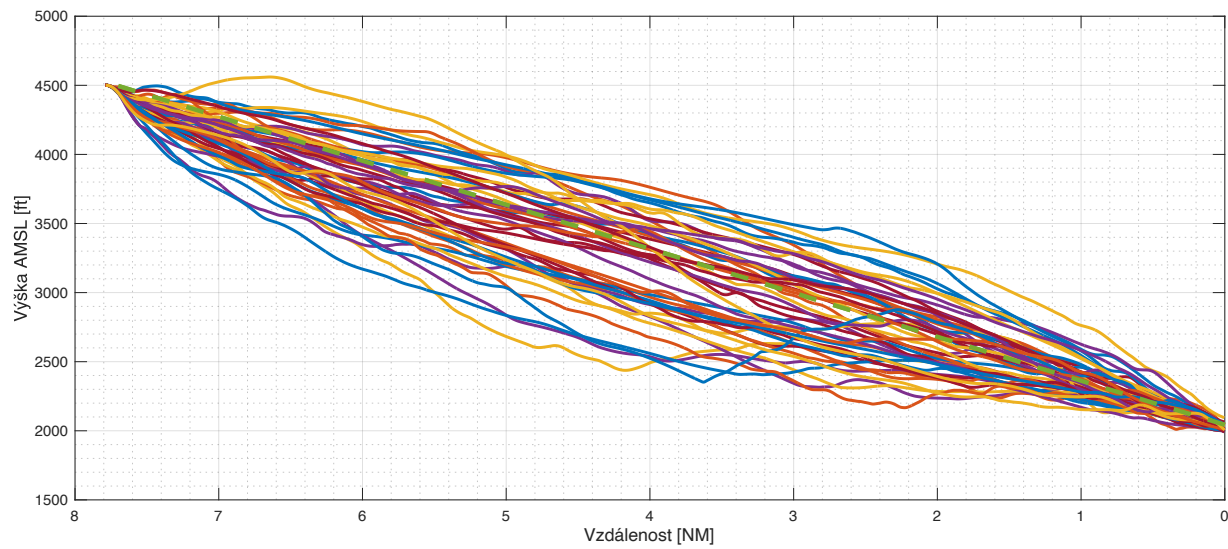
Pro prezentaci dat naměřených pro parametr vertikálního profilu – tedy vertikální odchylky od předepsané sestupové roviny  $3^\circ$  je na obrázcích 3.5, 3.6, 3.7, 3.8 uveden graficky znázorněný vertikální profil pro 4 měřená přiblížení, kde lze sledovat přibližný trend vertikální polohy letounu s ohledem na konkrétní podmínky v dané části scénáře. Pro názornost je vykreslena též i referenční rovina sledující  $3^\circ$  sestup.



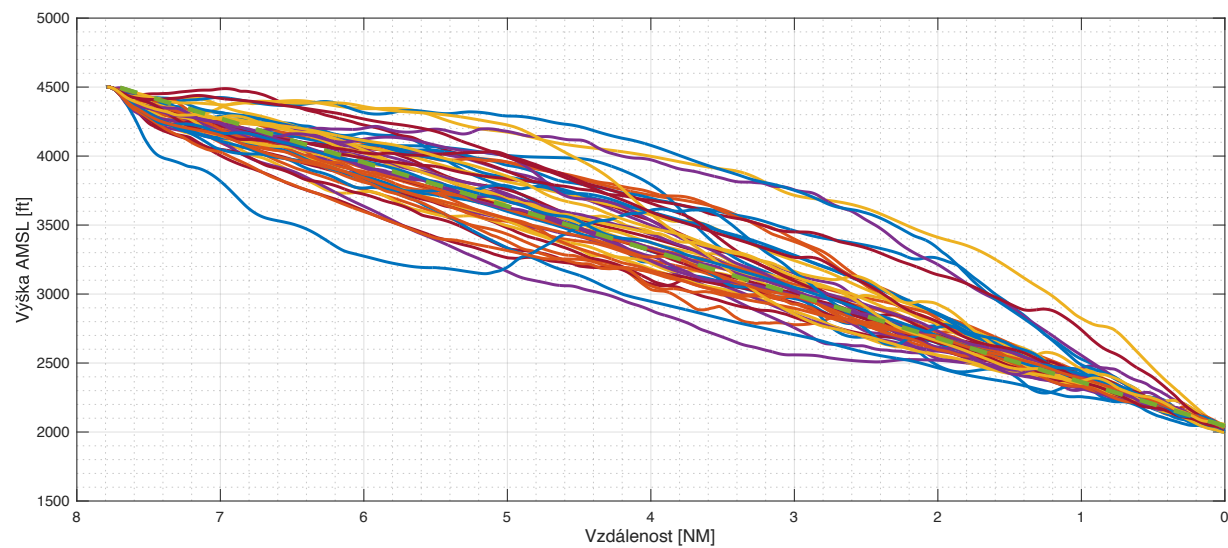
Obrázek 3.5: Vertikální profil prvního letu – den bez PAPI.

Po orientačním zhodnocení trendu naměřených dat vertikálního profilu byly určeny další vhodné parametry pro statistické hodnocení. Z vypočítaných hodnot RMSE, tak jak jsou uvedeny na obrázku 3.9 je možné sledovat, že správnost udržování sestupové roviny byla značně redukována mezi prvním a druhým letem, kdy došlo k přechodu z denní doby do nočních podmínek. Toto je podloženo výsledkem statistického Friedmanova testu. Post-hoc analýza ukázala významný rozdíl mezi 1., 3. a 4. proti letu druhému. Ve druhé a čtvrté části profilu tedy dochází k rozdílnému udržování správného sestupu a to při zachování stejných vnějších podmínek.

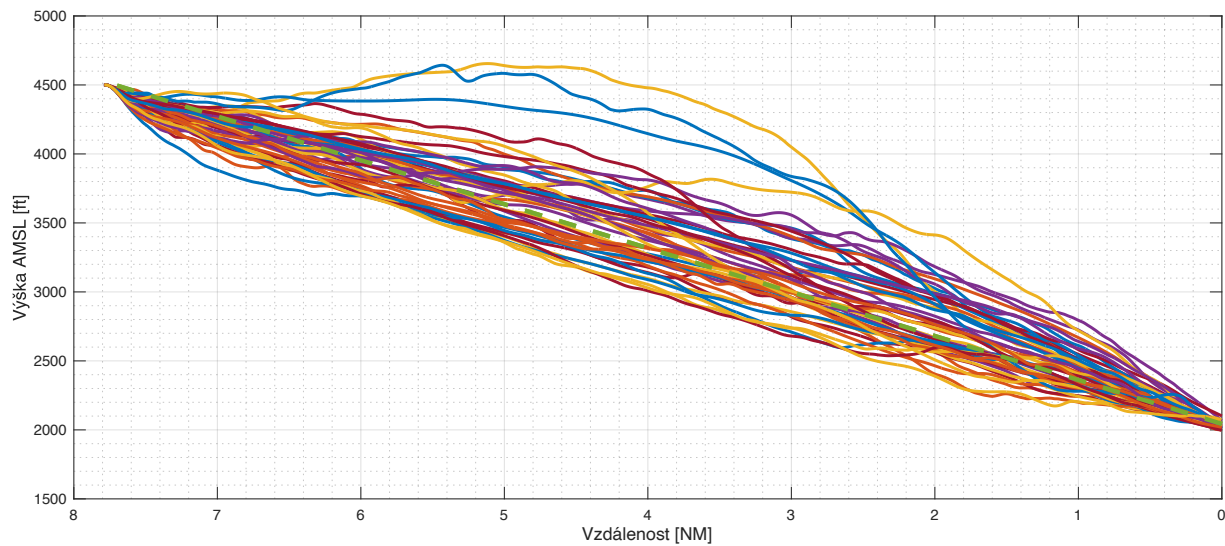
Z další infografiky 3.11 v podobě boxplotu znázorňujícího průměrné odchylky od ideální výšky sestupu je též možno pozorovat, že k nejvyšším odchylkám od ideální výšky docházelo při druhém letu. Post-hoc analýza ukázala významný rozdíl mezi 1., 3. a 4. letem proti letu druhému.



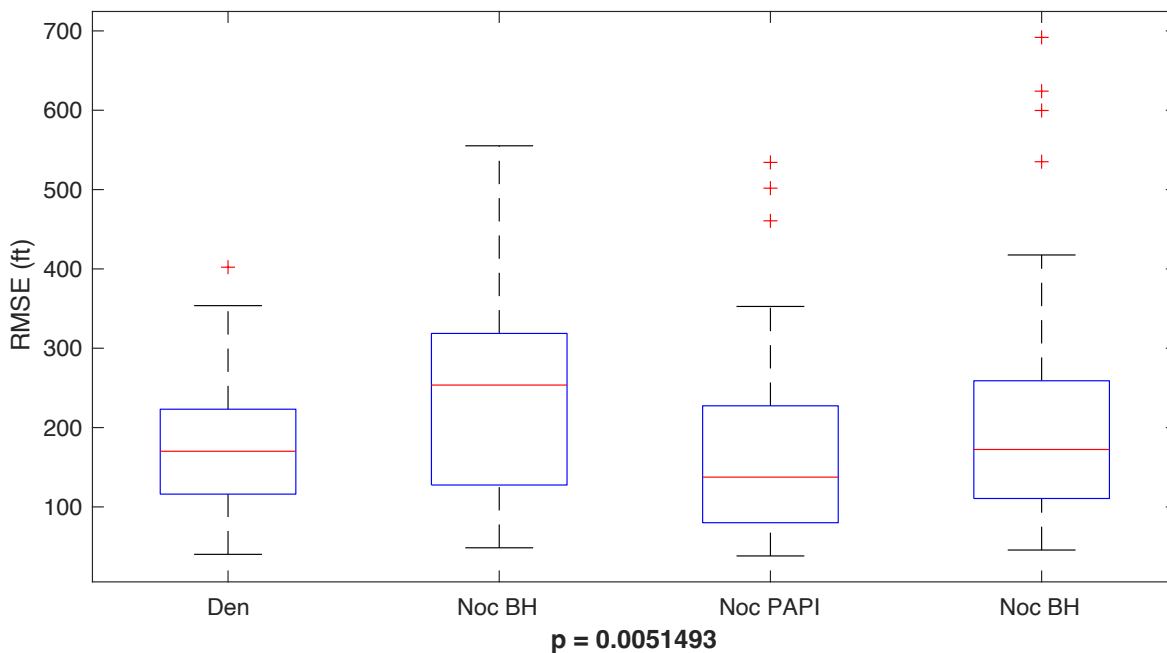
Obrázek 3.6: Vertikální profil druhého letu – noc bez PAPI.



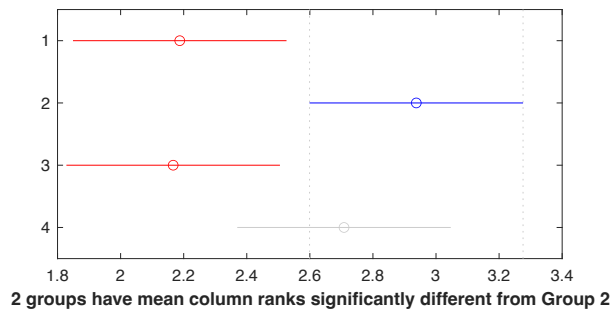
Obrázek 3.7: Vertikální profil třetího letu – noc s PAPI.



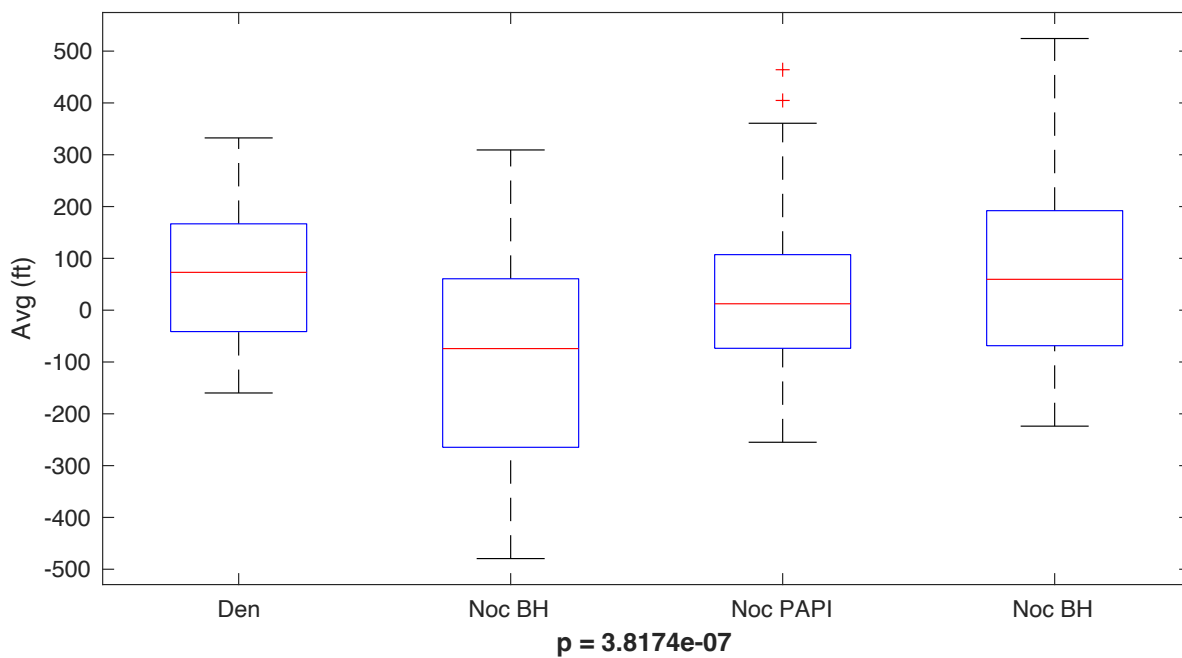
Obrázek 3.8: Vertikální profil čtvrtého letu – noc bez PAPI.



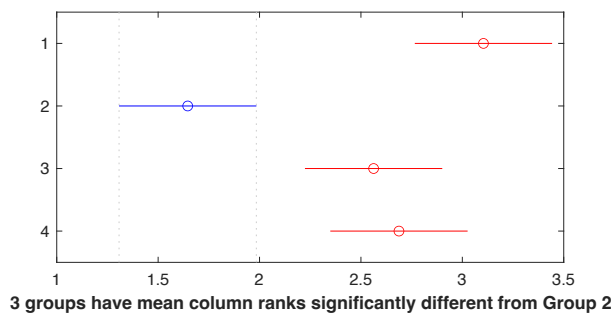
Obrázek 3.9: Distribuce naměřených hodnot RMSE pro vertikální profil sestupu 3° pro lety scénáře s určenou p-hodnotou (signifikantní rozdíl při  $p < 0.05$ ).



Obrázek 3.10: Post-hoc analýza – RMSE pro vertikální profil.

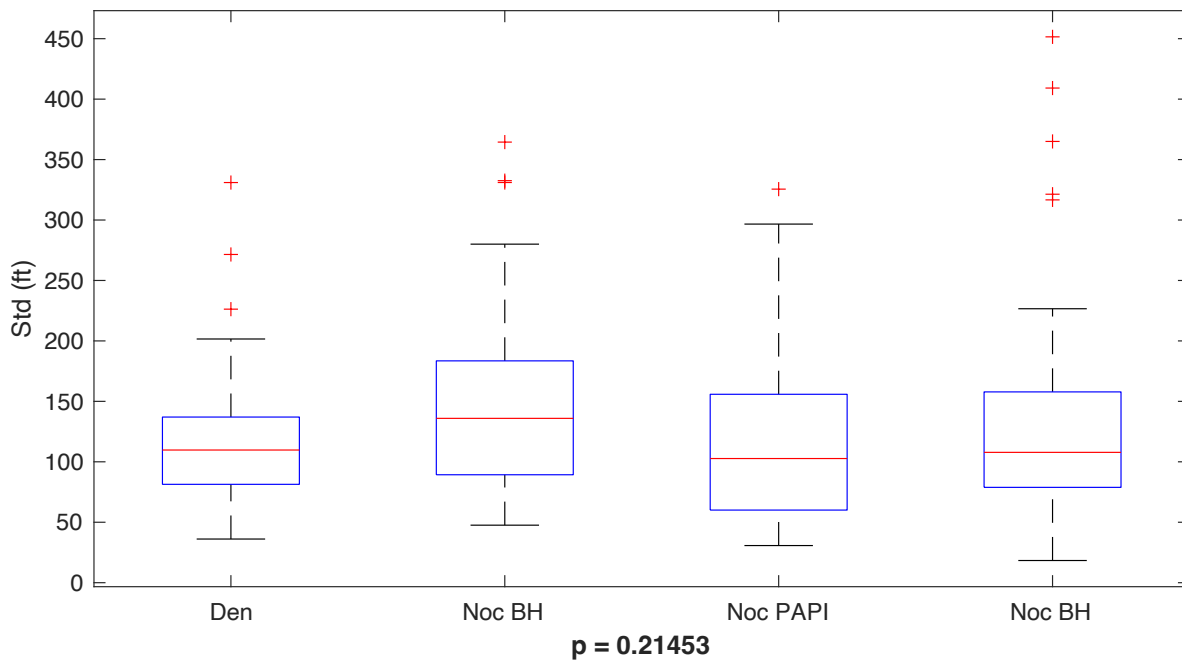


Obrázek 3.11: Distribuce průměrné vertikální odchylky od 3° sestupové roviny (signifikantní rozdíl při  $p < 0.05$ ).



Obrázek 3.12: Post-hoc analýza – průměrná vertikální odchylka.

Distribuce směrodatné odchytky je uvedena na boxplotu 3.13. Výsledek Friedmanova testu hypotézy neukazuje na významnou odchytku mezi jednotlivými částmi profilu, kdy při všech letech byla udržována přibližně stejná hodnota směrodatné odchytky, což ukazuje na shodnou tendenci k oscilaci odchytky od sestupové roviny pro všechny 4 lety scénáře.



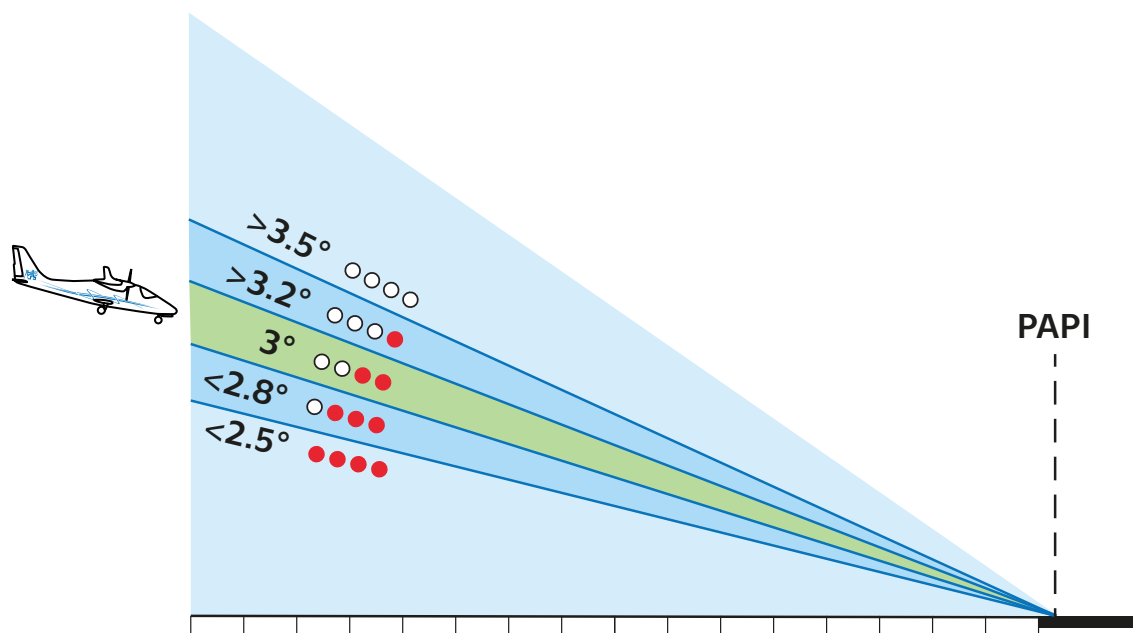
Obrázek 3.13: Distribuce směrodatné odchytky pro vertikální profil (signifikantní rozdíl při  $p < 0.05$ ).

Další zpracování dat bylo zaměřeno na potvrzení trendu dat a určení, zda subjekty ideální sestupovou rovinu podklesávaly či přestoupávaly, samotné RMSE totiž neukazuje na povahu dat ve smyslu směru odchylek, jelikož využívá chybu umocňuje. Vzhledem k datům z průměrné vertikální odchytky bylo navrženo použít rozdělení dle standardních úhlů, kterou sleduje indikace PAPI. Toto je určeno přestoupáním přes  $3.5^\circ$  a podklesáním pod  $2.5^\circ$ , což odpovídá 4 bílým indikacím systému PAPI při přestoupání, respektive 4 červeným indikacím při přílišném podklesání jak je znázorněno na obrázku 3.14.

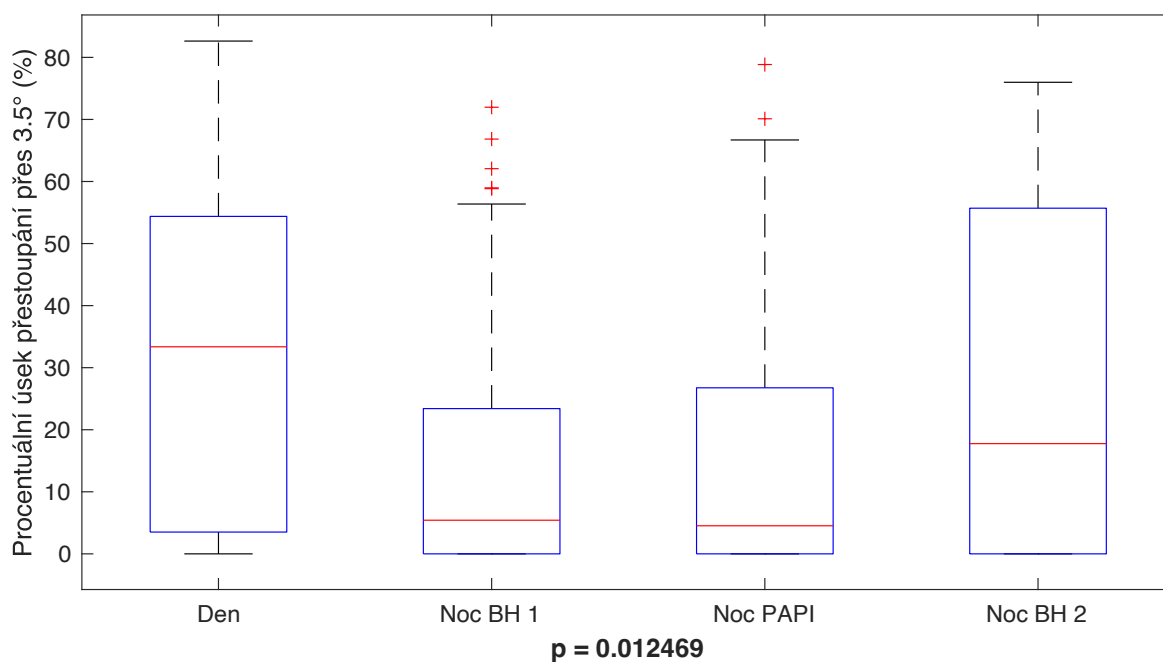
V krabicovém diagramu 3.15 je zřejmé, že k výraznému přestoupávání došlo během prvního a posledního měřeného letu. Friedmanův test ukázal na významnou odchytku dat, kdy je signifikantní rozdíl mezi prvním (ve dne) a druhým letem, který proběhl za podmínek BHI.

Distribuce procentuálního podílu doby letu pod  $2.5^\circ$  je vidět na obrázku 3.17, kdy medián pro druhý let dosahuje hodnoty téměř 30%, tedy subjekty měly tendenci rovinu výrazně podklesávat.

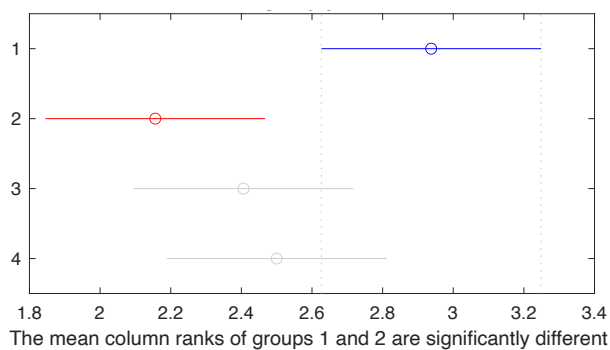




Obrázek 3.14: Rozdělení sektorů dle indikace PAPI využité pro porovnání tendencí k přesoupání či podklesání sestupové roviny.

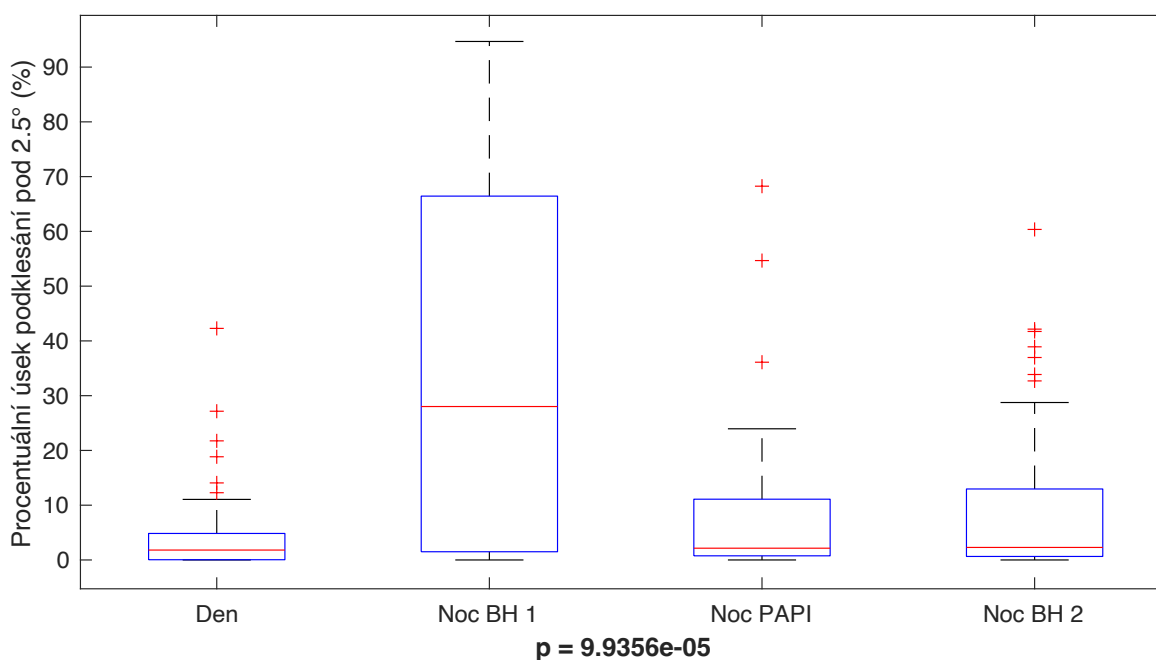


Obrázek 3.15: Distribuce procentuálního podílu nadstoupání (signifikantní rozdíl při  $p < 0.05$ ).

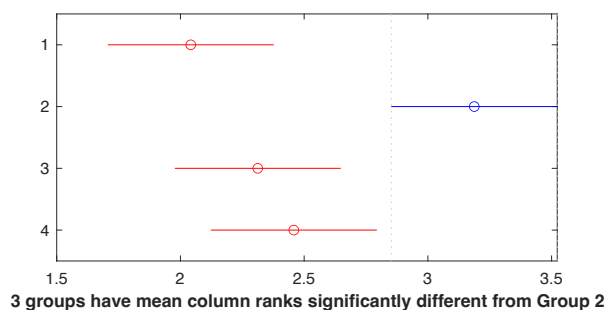


Obrázek 3.16: Post-hoc analýza nadstoupání sestupové roviny.

Následný test ukázal na silnou variabilitu mezi jednotlivými lety, kdy byla nalezen signifikantní rozdíl mezi druhým letem a letem prvním, druhým a třetím.



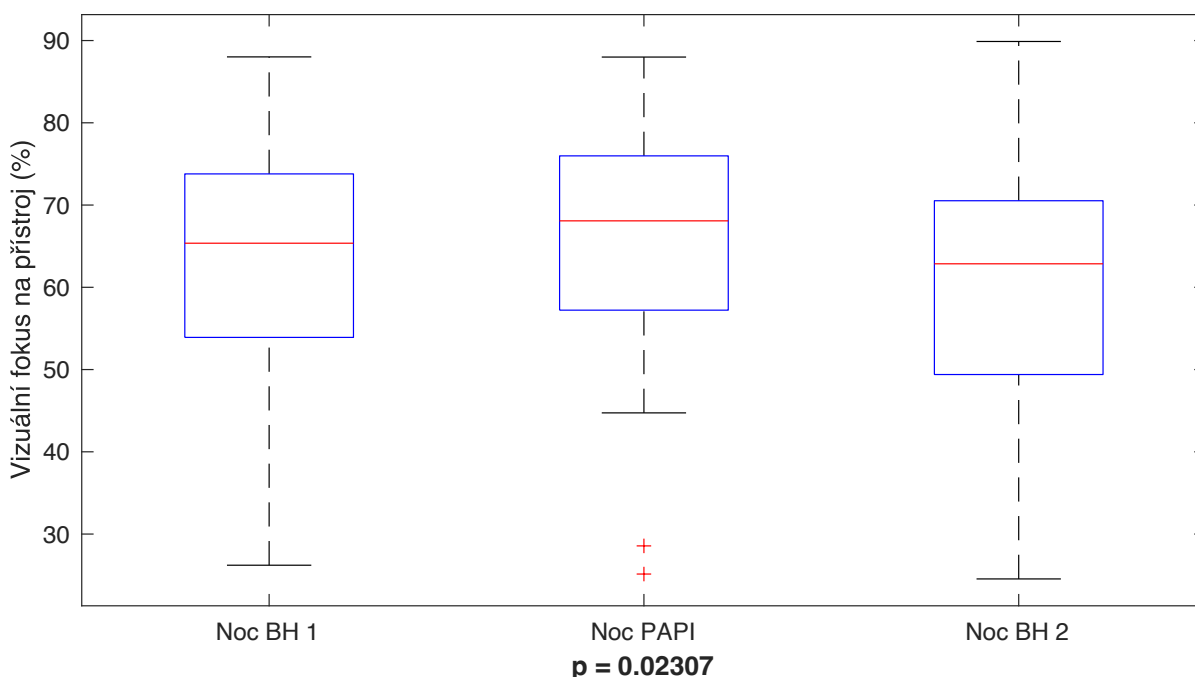
Obrázek 3.17: Distribuce procentuálního podílu podklesání (signifikantní rozdíl při  $p < 0.05$ ).



Obrázek 3.18: Post-hoc analýza podklesání.

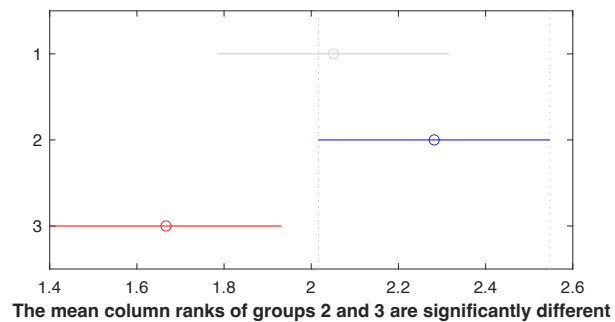
### 3.2 Vizualní fokus a rozdělení pozornosti

Na níže uvedeném boxplotu 3.19 je znázorněn procentuální poměr vizuálního fokusu na venkovní pohled z čelního okna s výsledkem testu hypotézy, kde byl identifikován signifikantní rozdíl při  $p < 0.05$ . Následná post-hoc analýza za signifikantně rozdílné určila let s PAPI oproti poslednímu měřenému letu bez aktivovaného PAPI systému.



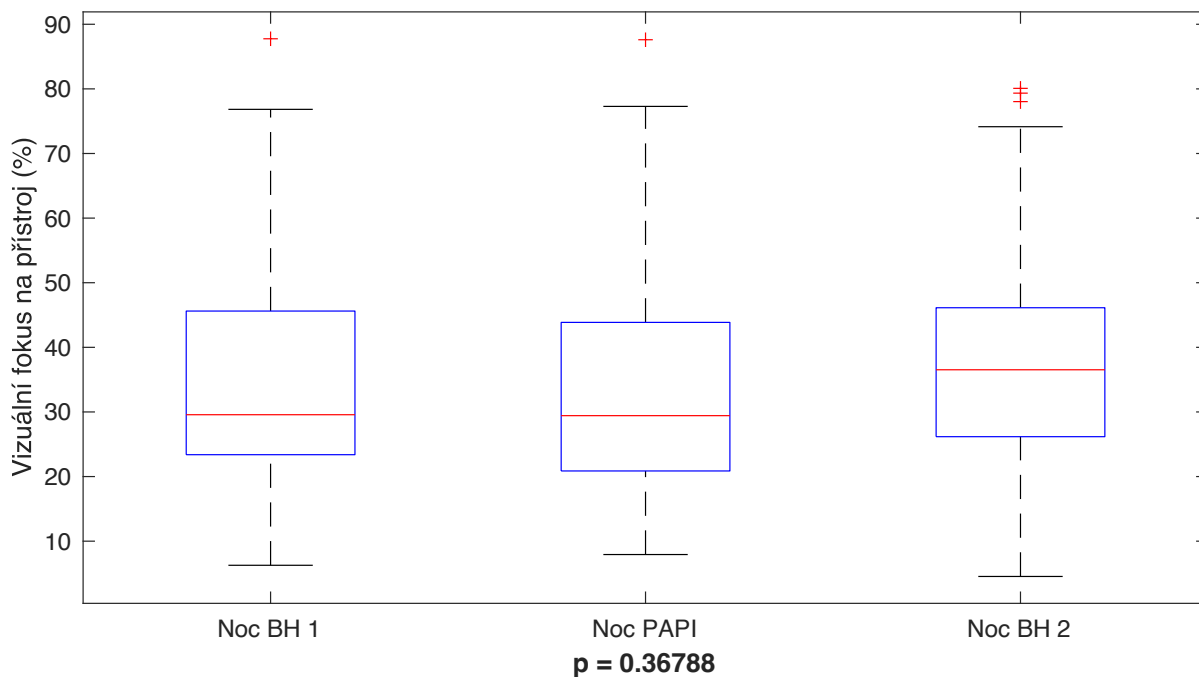
Obrázek 3.19: Distribuce rozdělení pozornosti (vizuální fokus) na venkovní scénu.

Pohled na distribuci vizuálního fokusu na přístrojový štít s hlavními letovými přístroji je na obrázku 3.21. Friedmanův test ani následná post-hoc analýza neodhalila žádné významné



Obrázek 3.20: Post-hoc pohled ven.

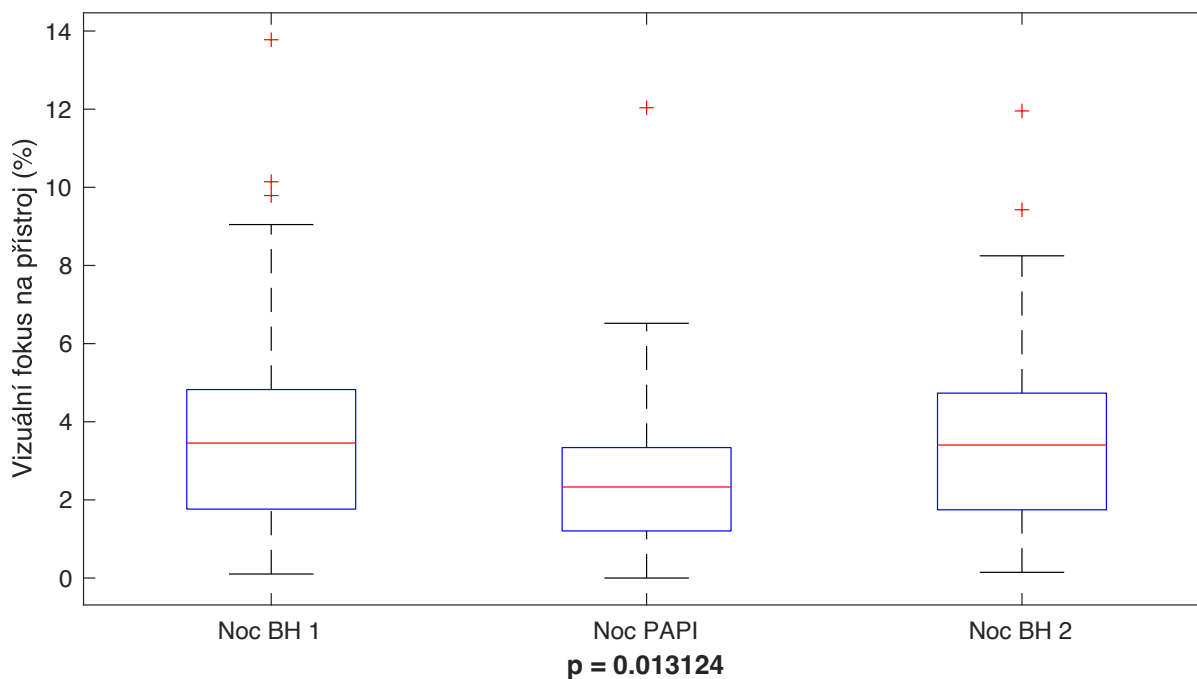
rozdíly. Nicméně je znatelný nepatrný nárůst poměrného sledování letových přístrojů při posledním letu oproti prvnímu letu za podmínek BHI a letu s PAPI světlý.



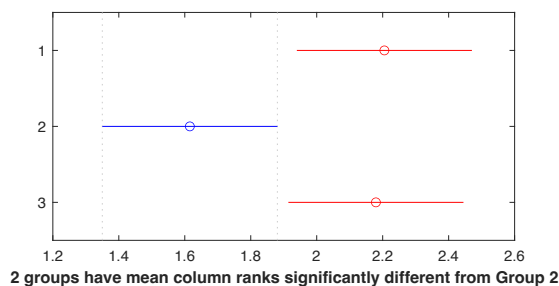
Obrázek 3.21: Procentuální distribuce rozdělení pozornosti (vizuální fokus) na hlavní letové přístroje.

Na následujících krabicových grafech jsou vyobrazeny výsledky procentuálního rozdělení pozornosti na jednotlivé hlavní letové přístroje.

U letového přístroje výškoměr 3.22 byl zjištěn statisticky významný rozdíl s  $p = 0,013$ . Následná post-hoc analýza ukázala signifikantní rozdíl mezi prvním letem v noci a letem podle PAPI (viz obrázek 3.23).



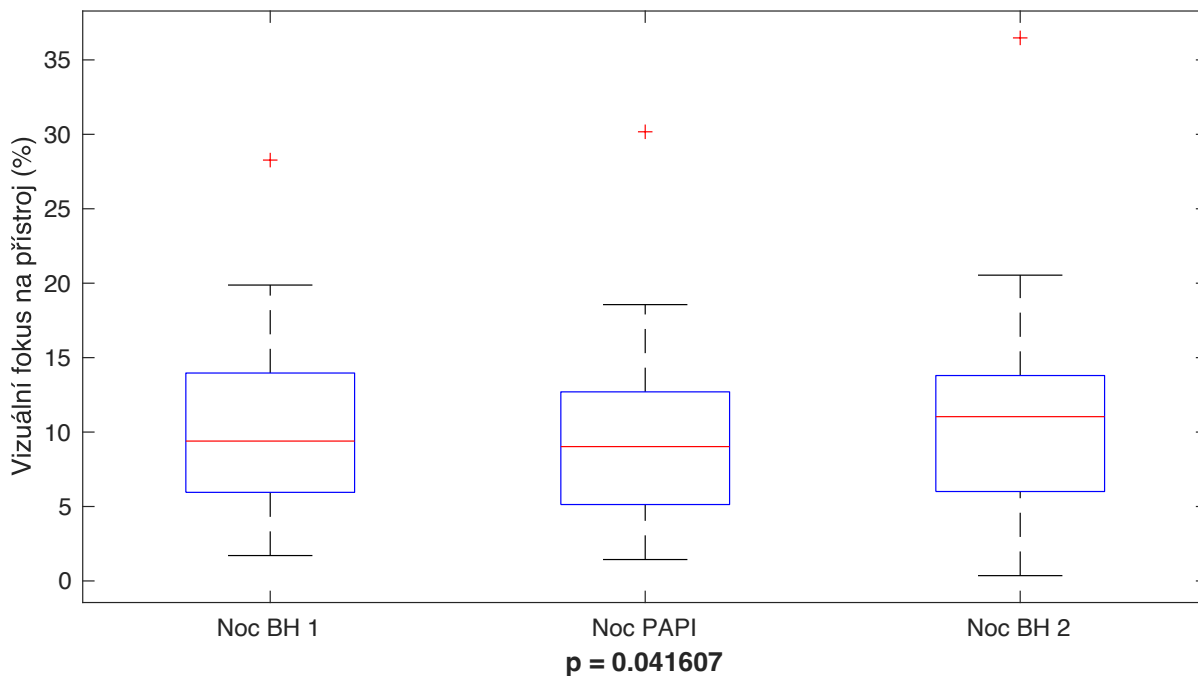
Obrázek 3.22: Procentuální distribuce rozdělení pozornosti (vizuální fokus) na výškoměr.



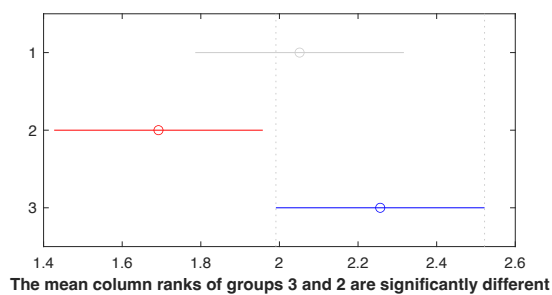
Obrázek 3.23: Post-hoc pohled na výškoměr.

Další signifikantní rozdíl byl zjištěn u rozdělení pozornosti na rychloměr s  $p = 0,041$ . Krabicový diagram je na obrázku 3.24 Post-hoc analýza odhalila rozdíl mezi letem s PAPI indikací a posledním přiblížením v noci.

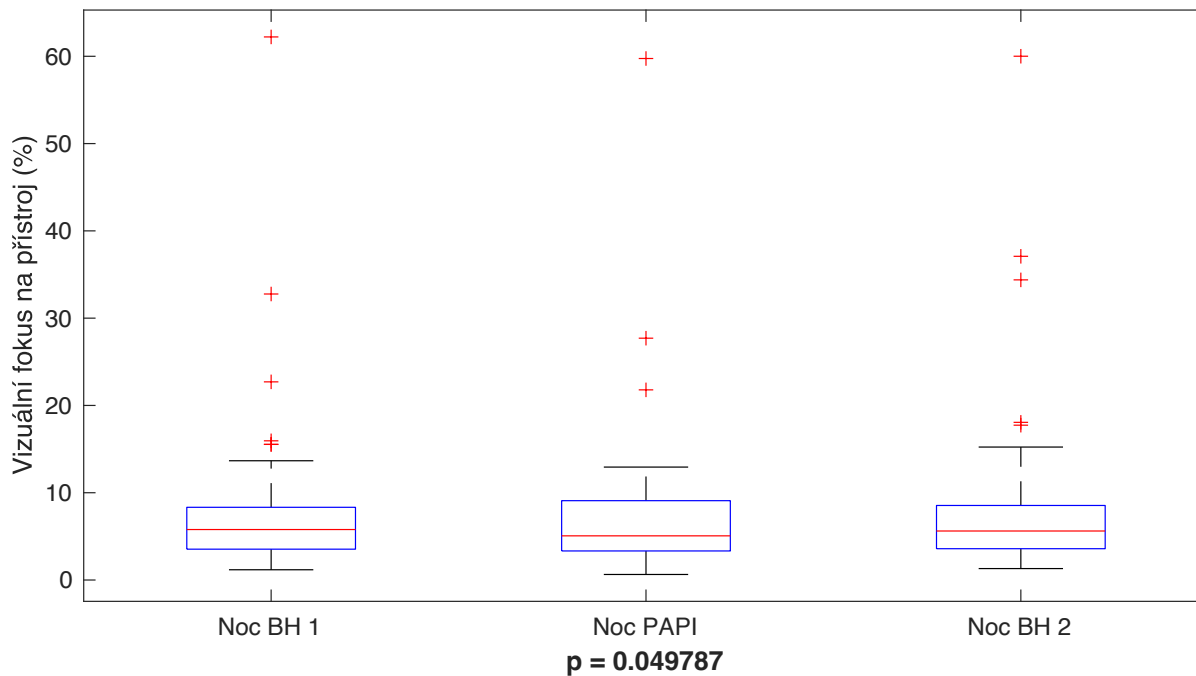
Vizuální fokus na umělý horizont narostl signifikantně po letu dle PAPI, kdy se na tento přístroj subjekty výrazněji soustředily během posledního letu, viz 3.26 a příslušná post-hoc analýza.



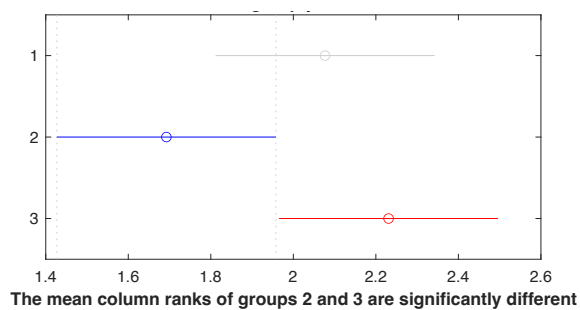
Obrázek 3.24: Procentuální distribuce rozdělení pozornosti (vizuální fokus) na rychloměr.



Obrázek 3.25: Post-hoc – analýza pohled na rychloměr.

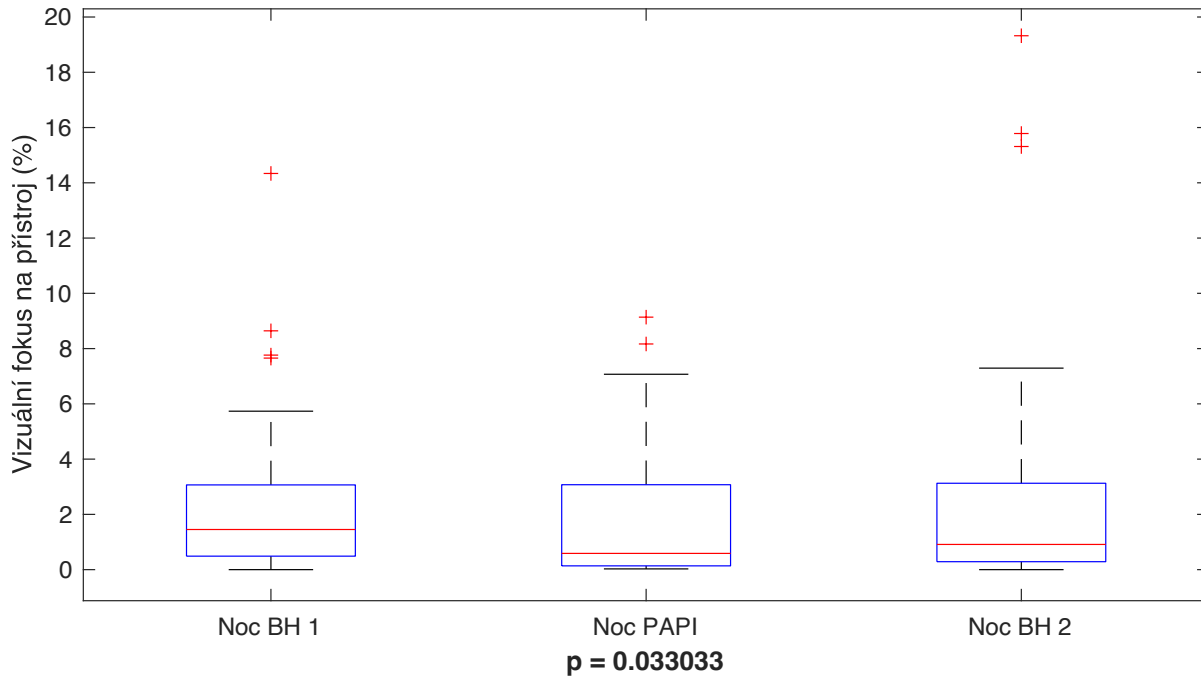


Obrázek 3.26: Procentuální distribuce rozdělení pozornosti (vizuální fokus) na umělý horizont.

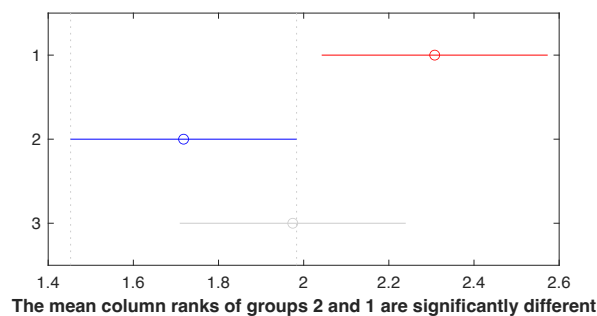


Obrázek 3.27: Post-hoc analýza – pohled na umělý horizont.

Jistá změna proběhla i pro fokus na zatáčkoměř, kdy byl signifikantní rozdíl zjištěn mezi prvním letem v noci a letem dle PAPI.



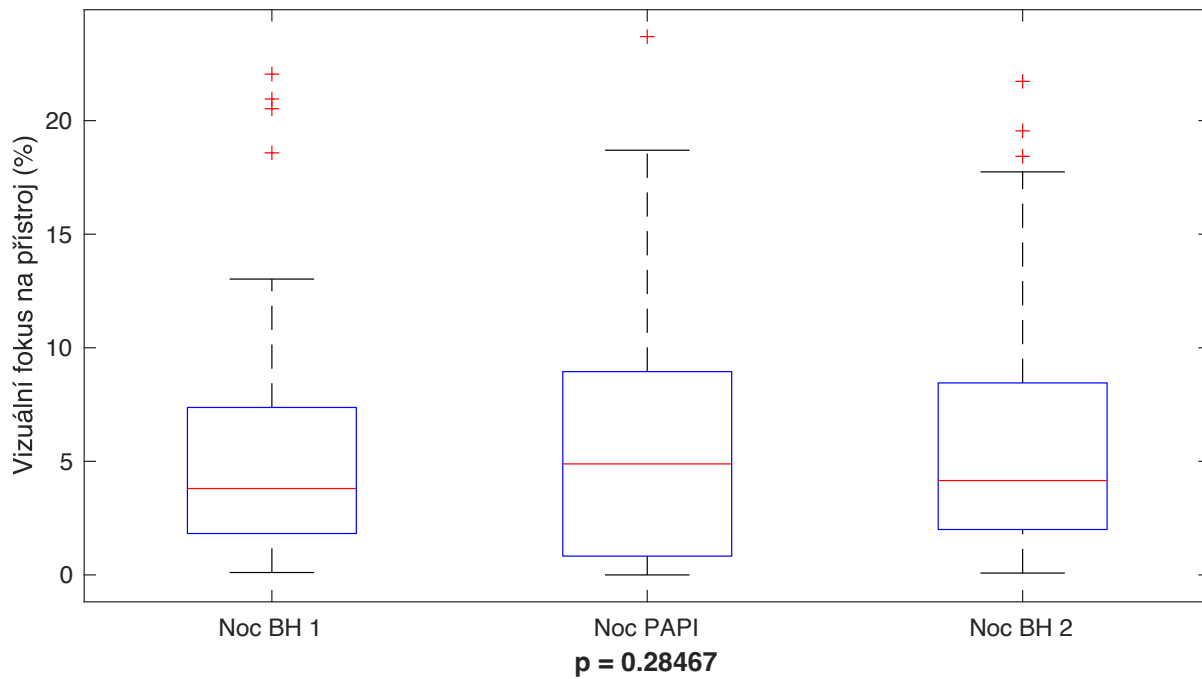
Obrázek 3.28: Procentuální distribuce rozdělení pozornosti (vizuální fokus) na zatáčkoměř.



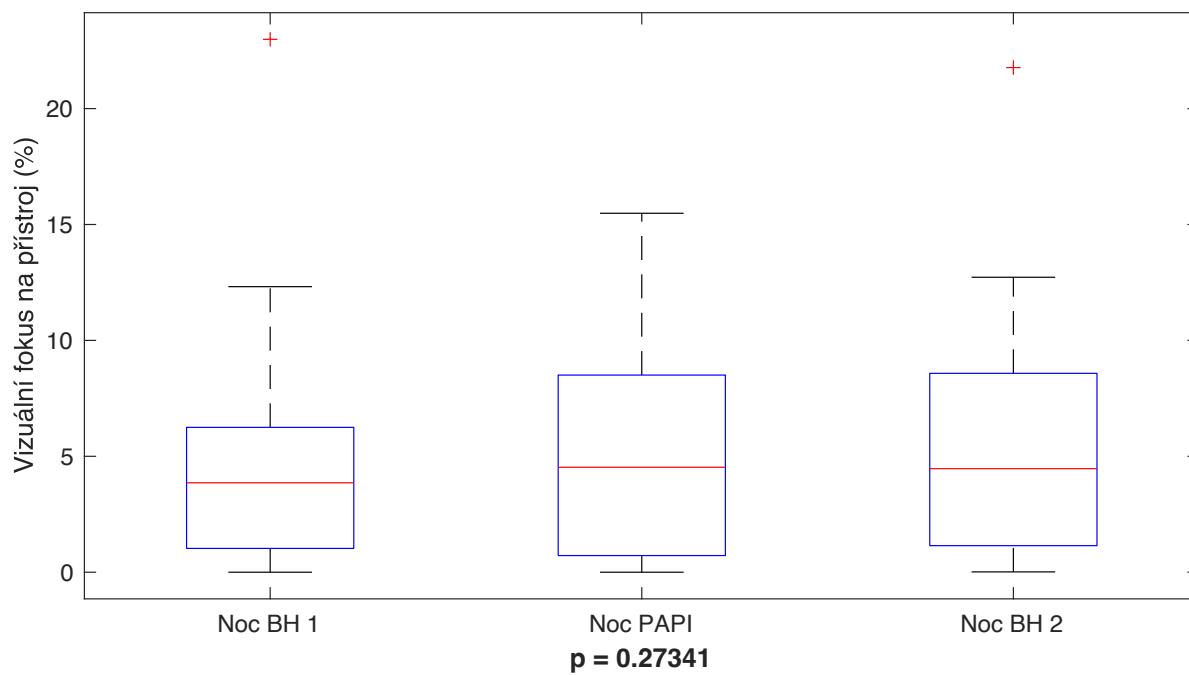
Obrázek 3.29: Post-hoc analýza – pohled na zatáčkoměř.

U dalších přístrojů nebyl zjištěn signifikantní rozdíl, nicméně jsou pro kompletnost uvedeny na následujících krabicových diagramech.





Obrázek 3.30: Procentuální distribuce rozdělení pozornosti (vizuální fokus) na směrový setrvačník.



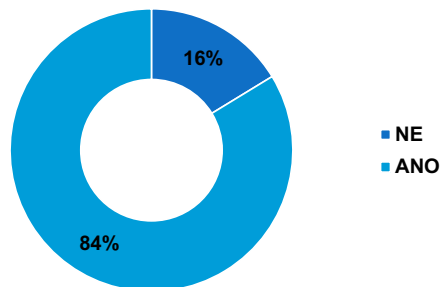
Obrázek 3.31: Procentuální distribuce rozdělení pozornosti (vizuální fokus) na variometr.

### 3.3 Zpětná vazba po experimentu

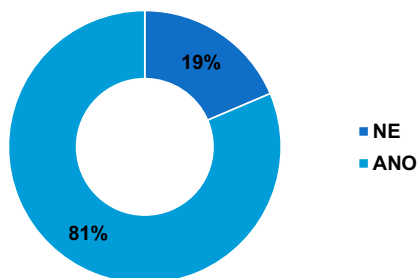
Součástí dotazníkového šetření po experimentu bylo několik jednoduchých otázek týkající se vjemu z provedeného měření a konkrétně věrnosti simulovaného scénáře vizuální iluze 3.32.

Otázky sestávaly ze subjektivního názoru na příspěvek VR k leteckému výcviku a potenciálu být zařazen přímo do výcvikové osnovy nočního výcviku a rozšířila bázi znalostí ještě před samotným praktickým výcvikem (viz obrázek 3.33).

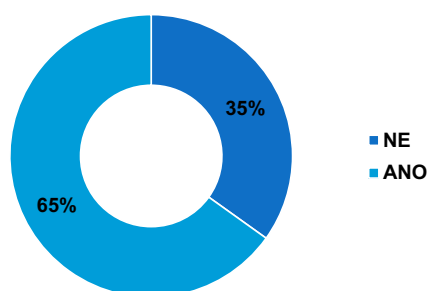
Daný vzorek pilotů byl též dotázán na předchozí zkušenosti a setkání se se situací, kdy došlo ke ztrátě situačního povědomí v důsledku nedostatku toku vizuálních informací, především při letu za VMC a sníženém počtu terénních prvků a členitosti.



Obrázek 3.32: Myslíte si, že prostředí VR podobné tomu, které jste vyzkoušeli během experimentu, je schopné věrně simulovat vizuální iluze, jako je iluze přiblížení přes černou díru?



Obrázek 3.33: Máte pocit, že podobná VR simulace, které jste se zúčastnili, by zlepšila kvalitu nočního výcviku?



Obrázek 3.34: Zažil/a jste někdy během letu potíže způsobené nedostatkem vizuálních referencí? (IFR i VFR).



## 4 Diskuze

Realizovaný experiment je v následujících částech diskutován spolu s hodnocením dosažených výsledků oproti hypotézám definovaných v úvodu této práce. Jsou analyzovány výsledné trendy vertikálního profilu a nastíněny nové hypotézy při porovnání letových dat a dat ze sledování rozdělení pozornosti mezi panel přístrojů a venkovní scénu.

### 4.1 Vertikální profil a rychlost

Již z vyobrazených průběhů vertikálního profilu pro jednotlivé lety scénáře je možno dedukovat prvotní poznatky o provedeném experimentu, které je poté možno po přezkumu statistických ukazatelů dále rozvinout.

Návrh letového scénáře proběhl i s ohledem na možnost přezkumu trendů, které subjekty vykazují při dobré světelné situaci s větším množstvím vizuálních referencí, tedy ve dne, kdy je možné sledovat zemský povrch a lépe odhadovat svou polohu. První část experimentu nevykazovala žádné znepokojivé úkazy a účastníci experimentu byli schopni vertikální profil udržovat bez větších potíží. Sledovat můžeme tendenci letět mírně nad ideální rovinu, což může být připisováno snahou při jakýchkoliv pochybách držet větší výšku, tedy držet odstup od země, což je pro trénované piloty přirozený návyk. Pokud jen trochu můžeme, snažíme si držet odstup od potenciálního nebezpečí. Tento trend byl sledován již i v minulosti proběhlých studiích, kdy ve dne dochází k nadhodnocení vzdálenosti od dráhy a tedy je držena větší výška odpovídající této vzdálenosti [34].

Pozornost však jistě přitahuje následný trend, tedy přechod do nočních podmínek, kdy byla simulována situace v iluzi černé díry. Již vizuálně můžeme dle trendů vertikálního profilu sledovat tendenci podklesávat sestupovou rovinu až do nebezpečně nízkého přiblížení. Tento jev není třeba nijak dále představovat, jelikož je podstatou problému iluze černé díry a pravý důvod její nebezpečnosti. Během druhého letu byla též pozorována statisticky významná chybovost při udržování předepsané indikované rychlosti na sestupu. Toto je možno přičíst poklesu situačního povědomí z důvodu vyššího smyslového zatížení a nárokům na kognitivní funkce. Je však nutno podotknout, že udržované rychlosti neměly trend klesat do nebezpečně nízkých hodnot blížících se pádové rychlosti. Z prvních dvou částí experimentu tedy můžeme hodnotit, že při snížení vizuálních



vjemů při letu v noci opravdu dochází k degradaci letové výkonnosti pilotů, obzvláště pokud jde o přechod do tak náročných podmínek jako je prostředí s charakterem černé díry.

K nejvyšší tendenci podklesávat sestupovou rovinu během vizuálního přiblížení, tedy během experimentu, docházelo v druhé měřené části. Nejznatelnější tendence k podklesávání sestupové roviny je z letových dat vertikálního profilu ztelná mezi 6 NM od prahu dráhy až ke druhé míly od prahu dráhy. Zajímavým poznatkem byla též pozorování již v průběhu experimentu, kdy opakovaně docházelo k tak silné iluzi a ztrátě situačního povědomí, že došlo k nebezpečnému sblížení se zemí, které bylo odhaleno až v poslední fázi, kdy došlo k nasvícení scenerie přistávacími reflektory samotného letounu. V několika případech též došlo k určité autodetekci iluze samotnými subjekty. V takovém případě došlo k opravě výškového profilu, standardně přechodem do horizontálního letu po dobu, dokud není opět dosaženo správnější sestupové roviny. Dle pozorování k tomuto jevu docházelo těsně před 2 NM od prahu dráhy, kdy bylo popsána silná tendence klesat na přistání s velice rychlým zjištěním svého chybného úsudku.

Přechodem k třetí části experimentu, tedy letu podle reference poskytované systémem PAPI, můžeme sledovat značné zlepšení sledovaného parametru vertikálního profilu. Toto je možno zcela jistě připisovat zlepšeným tokem informací, kdy má pilot zcela jasnou indikaci o své vertikální situaci. Tento systém bylo možno bezpečně užít již od počátku měřeného letu, jelikož PAPI mají v nočních podmínkách ztelně vyšší dosah než při osvětlené scéně. Měřené přiblížení tedy oproti druhému letu vykazovalo zvýšení letové výkonnosti, která byla porovnatelná s prvním letem a dle parametru RMSE, tedy správnosti výškového profilu můžeme soudit, že byl sestup letěn přesněji, než jakýkoliv z letů. Během třetího letu nebyl zaznamenán žádný výskyt sblížení se zemí ani tendence výrazně podklesávat sestupovou rovinu.

Záměrem posloupnosti letěných přiblížení bylo ve třetí fázi poskytnout vertikální vedení, které by pilota drželo na správné trajektorii. Tuto zkušenost by poté bylo možno replikovat při závěrečném letu opět v podmínkách iluze černé díry bez vertikálního vedení. Z prezentace výsledků je opravdu možno soudit, že při posledním letu došlo k nižší tendenci podklesávat předepsaný úhel sestup. Došlo až k takovému zlepšení parametrů vertikálního vedení letounu, že pro hodnotu RMSE byl zjištěn signifikantní rozdíl mezi druhým a čtvrtým letem. Toto je tedy třeba zkoumat podrobněji jelikož data ukazují na určitý proces učení, ke kterému došlo v průběhu experimentu či jeho části, konkrétně mezi druhým a čtvrtým letem, kdy tedy proběhlo jedno přiblížení s využitím indikace PAPI.



## 4.2 Rozdělení pozornosti

Sesbíraná data ze sledování očí umožnila sledovat variaci rozdělení pozornosti napříč letovým scénářem. Z praktických důvodů nebyla analyzována data pro první let ve dne, jelikož byl předpoklad, že docházelo k široké škále oblastí zájmu. Především proto, že byl dostatek osvětlení pro sledování zemského povrchu pod letounem. Pilot se tedy mohl rozhlížet ze všech dostupných průzorů letounu, což by bylo technicky složité zachytit pomocí dostupného software sledování očí.

Data příslušná ke třem následným částem experimentu tedy byla analyzována dostupnými metodami a to i s ohledem na kvalitu dostupného souboru dat. Celkově slabou stránkou experimentu je totiž nižší schopnost detekce přístrojů na přístrojovém štítu, což je pro zhodnocení výkonnosti během druhého a čtvrtého letu experimentu kritický nedostatek. Z dostupných dat však bylo vytěženo maximum a poskytují tedy informace tak, jak je uvedeno v části 3.2. Porovnáním rozdělení pozornosti mezi venkovní scénou obsahující dráhu, tedy pohledem z čelního okna, vůči pozorností směřovanou na přístrojové vybavení je možné sledovat jasné zvýšení koncentrace na venkovní scénu při letu dle systému PAPI na který tedy měřené subjekty spoléhaly. Pro oba noční lety bez vertikálního vedení lze sledovat vyšší koncentraci na přístrojové vybavení. Mezi druhým a čtvrtým letem však nebyla zjištěna statisticky významná změna v rozdělení pozornosti, sledovat lze pouze jisté zvýšení koncentrace při posledním letu.

Jak však bylo zmíněno, mezi třetím a čtvrtým letem však na rozdíl od druhého letu byl zjištěn statisticky významný rozdíl což nastiňuje, že opravdu došlo ke změně rozdělení pozornosti mezi prvním letem v podmínkách BHI a čtvrtým, kdy byl subjekt opět odkázán pouze na referenci k osvětlené dráze a na údaje z letových přístrojů. Lze tak soudit, že nedošlo k „naučení“ správného tvaru a perspektivy dráhy ale k tendenci letět přiblížení více přístrojově, což je obecně známý přístup k létání v náročných podmínkách jelikož důvěra v letové přístroje je učena již od počátku leteckého výcviku.



## 5 Závěr

Prostředí virtuální reality a její aplikace v podobě simulátorů podobných tomu použitému pro účely experimentu popsaného v této práci pomáhají redukovat náklady oproti reálnému měření a též zvyšují flexibilitu při samotném provádění experimentů nebo výcviku.

Tento trend je všeobecně přítomný v mnoha rozličných odvětvích a letectví není výjimkou. Kromě využití při výcviku údržby a syntetickému treninku předletových postupů v kokpitu jsou již v rámci EASA certifikovány i první aplikace pro letový výcvik. [45]

V rámci této diplomové práce bylo cílem experimentálně ověřit příčinnost přiblížení při iluzi černé díry. Teoretická část práce se zabývala analýzou současného stavu v oblasti dané iluze. V praktické části měla práce za úkol navrhnout a vykonat experiment, který by obsahoval navození dané iluze. Experiment byl proveden na pilotech, jejichž úkolem bylo zalétnout přiblížení na VR simulátoru. Během experimentu docházelo ke sběru dat. Jednalo se konkrétně o letová data a data týkající se pohybu očí. Aby bylo možné určit, zda člověk iluzi podlehl, musel v ní zachybovat a opravdu ji podlehnout. To bylo možné poznat z letových dat. Nicméně je nutné uvažovat limitaci, že vzhledem k provádění třech měření po sobě, bylo možné, že mohli účastníci po prvním přiblížení letět schválně výše. Zajímavé však je, že při prvním letu v podmínkách simulované iluze měli obě skupiny tendenci výrazně přestoupávat nebo podklesávat ideální sestupovou rovinu.

Provedené měření spolu s platformou VR simulátoru umožnilo navodit realistické podmínky, což je znatelný pokrok oproti v minulosti již provedeným výzkumům, jejichž nejzřetelnějším nedostatkem nebyla užitá metoda nebo způsob evaluace dat, nýbrž samotné platformy experimentu, kdy vzhledem k technickým možnostem tehdejší doby byly použity poměrně triviální sestavy a přípravky simulující daný scénář experimentů, které neumožňovaly komplexní simulaci scénáře a tudíž i navození realistických podmínek a vjemu iluze černé díry [46]. O věrohodnosti simulované iluze svědčí nejen výskyt dat korelující se základními hypotézami, ale též subjektivní hodnocení po provedeném experimentu, kdy byla získána pozitivní zpětná vazba a provedené lety byly hodnoceny jako hodnotná zkušenost pro noční létání.

Paralelně s experimentem popsaným v této práci v současnosti probíhají též další studentské práce zabývající se vizuálními iluzemi s důrazem právě na iluzi černé díry ve fázi konečného přiblížení. Je zde tak potenciál zužitkovat právě zjištěné poznatky pro tyto práce a rozvíjet tak studium tohoto fenoménu. Možným směřováním by mělo být zdokonalení monitoringu vizuálního



fokusu s využitím sledování očí ve smyslu pokročilejší detekce venkovních prvků, především tedy samotného dráhového systému, což by mohlo zvýšit bázi znalostí a blíže určit formování situačního přehledu v prostředí se sníženým množstvím vizuálních referencí nebo letu nad nečlenitým povrchem.

Dalším možným směřováním by měla být kvantifikace vlivu zkušeností na náchylnost k vizuálním iluzím s analýzou rozdělení pozornosti. Poznatky z těchto studií by pak ideálně měly být zapracovány do výcvikových osnov tak, aby bylo dosaženo zvýšené povědomosti o výskytu iluzí a jejich předcházení. Toto by mohlo být, i vzhledem ke zmíněnému trendu poslední doby, podpořeno syntetickým výcvikem při letových scénářích podobných tomu realizovanému v této práci.





## Seznam použité literatury

1. KRAFT, Conrad L. A Psychophysical Contribution to Air Safety: Simulator Studies of Visual Illusions in Night Visual Approaches. In: *Psychology: From Research to Practice*. Springer US, 1978, s. 363–385. Dostupné z DOI: 10.1007/978-1-4684-2487-4\_21.
2. MERTENS, H.W. Runway image shape as a cue for judgment of approach angle: Disertační práce. 1979.
3. ICAO. *Annex 14: Aerodromes — Volume I, Aerodrome Design and Operations*. 8. vyd. Montreal, Quebec, Canada: International Civil Aviation Organization, 2018. ISBN 978-92-9258-483-2.
4. SEIDL, Zdeněk. *Neurologie pro studium i praxi*. 2., přeprac. a dopl. vyd. Praha: Grada, 2015. ISBN 978-80-247-5247-1.
5. KHATWA, Rathan; HELMREICH, Robert L. Analysis of Critical Factors During Approach and Landing in Accidents and Normal Flight. In: *Flight Safety Digest*. Alexandria, VA, USA: Flight Safety Foundation, 1999, sv. 17,18, s. 4–77.
6. CAE OXFORD AVIATION ACADEMY. *Human Performance and Limitations: ATPL Ground Training Series*. UK: KHL Printing Co. Pte Ltd, 2014.
7. NEWMAN, David G. *An overview of spatial disorientation as a factor in aviation accidents and incidents*. Canberra City, Australian Capital Territory; Springfield, Va: Australian Transport Safety Bureau; National Technical Information Service, 2007. ISBN 978-1-921165-52-8. Dostupné také z: <https://www.atsb.gov.au/media/29971/b20070063.pdf>. OCLC: 4492387205.
8. *ALAR tool kit: Approach-and-landing Accident Reduction*. Official release v. 3.0. Alexandria, VA: Flight Safety Foundation, 2000.
9. ANTUANO, Melchor. *Medical Facts for Pilots*. Oklahoma: FAA Civil Aerospace Medical Institute.
10. VÁGNEROVÁ, Marie. *Obecná psychologie: dílčí aspekty lidské psychiky a jejich orgánový základ*. Praha: Univerzita Karlova, nakladatelství Karolinum, 2016. ISBN 978-80-2463-268-1.



11. FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. *Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge*. USA, 2016.
12. PREVIC, Fred H.; ERCOLINE, William R. (ed.). *Spatial Disorientation in Aviation*. American Institute of Aeronautics a Astronautics, 2004. Dostupné z DOI: 10.2514/4.866708.
13. BEDNAREK, Hanna; TRUSZCZYŃSKI, Olaf; WUTKE, Karolina. Cognitive Determinants of Pilots' Effectiveness Under a False Horizon Illusion. *The International Journal of Aviation Psychology*. 2013, roč. 23, č. 3, s. 267–287. Dostupné z DOI: 10.1080/10508414.2013.799363.
14. SÁNCHEZ-TENA, Miguel Ángel; ALVAREZ-PEREGRINA, Cristina; VALBUENA-IGLESIAS, M<sup>a</sup> Carolina; PALOMERA, Pablo Ruisoto. Optical Illusions and Spatial Disorientation in Aviation Pilots. *Journal of Medical Systems*. 2018, roč. 42, č. 5. Dostupné z DOI: 10.1007/s10916-018-0935-4.
15. CALVERT, E. S. Visual Judgments in Motion. *Journal of Navigation*. 1954, roč. 7, č. 3, s. 233–251. Dostupné z DOI: 10.1017/s0373463300020907.
16. SIPES, W.E.; LESSARD, C.S. A spatial disorientation survey of experienced instructor pilots. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*. 2000, roč. 19, č. 2, s. 35–42. Dostupné z DOI: 10.1109/51.827403.
17. SCHIFF, Barry. Visual Illusions Can Spoil Your Whole Day: No matter the size or speed of the aircraft, pilots who find themselves in the dark at low altitudes are subject to the misleading effects of spatial disorientation and other visual pitfalls. *Accident prevention*. 1990, roč. 47, č. 3, s. 1–4. ISSN 0898-5774.
18. NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD. *Aircraft Accident Report: United Airlines, Inc., Boeing 727, N7036U, in Lake Michigan*. Washington D.C., 1965.
19. CIVIL AERONAUTICS BOARD. *Aircraft Accident Report: American Airlines, Inc., Boeing 727, N1996, Near the Greater Cincinnati Airport, Constance, Kentucky*. Washington D.C., 1966.
20. CIVIL AERONAUTICS BOARD. *Aircraft Accident Report: United Airlines, Inc., Boeing 727, N7030U, Salt Lake City, Utah*. Washington D.C., 1966.
21. *Database: All Nippon Airways, JA8302, Tokyo Bay*. Virginia. Dostupné také z: <https://aviation-safety.net/database/record.php?id=19660204-0>.



22. NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD. *Aircraft Accident Report - Pan American World Airways, Inc., being 707-3215, Nk454A, Pago Pago, American Samoa, January 30, 1974*. Federal Aviation Administration, 1977. National Transportation Safety Board and Bureau of Accident Investigation. Report no.: NTSB-AAR-77-7.
23. NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD. *National Transportation Safety Board: Aviation Accident Final Report*. 2017.
24. MOHER, D.; LIBERATI, A.; TETZLAFF, J.; AND, D. G Altman. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. *BMJ*. 2009, roč. 339, č. jul21 1, s. b2535–b2535. Dostupné z DOI: 10.1136/bmj.b2535.
25. LEWIS, M. F.; MERTENS, H. W. Pilot performance during simulated approaches and landings made with various computer-generated visual glidepath indicators. 1979, roč. Report no.: FAA-AM-79-4.
26. W., Mertens H. Perception of runway image shape and approach angle magnitude by pilots in simulated night landing approaches. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*. 1981, roč. 52, s. 373–386.
27. LEWIS, M. F.; MERTENS, H. W. Effects of approach lighting and variation in visible runway length on perception of approach angle in simulated night landings. 1982, roč. Report no.: FAA-AM-82-6.
28. PERRONE, J.A. Visual slant misperception and the "black-hole" landing situation. *Technical Memorandum No. NASA-TM-85866*. 1983, s. 1020–1025. Dostupné také z: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19840008727>.
29. LINTERN, Gavan; WALKER, Michael B. Scene Content and Runway Breadth Effects on Simulated Landing Approaches. *The International Journal of Aviation Psychology*. 1991, roč. 1, č. 2, s. 117–132. Dostupné z DOI: 10.1207/s15327108ijap0102\_3.
30. KALLUS, K. W.; TROPPER, K. Evaluation of a spatial disorientation simulator training for jet pilots. *International Journal of Applied Aviation Studies*. 2004, roč. 4, č. 1, s. 45–55.
31. GIBB, Randy; SCHVANEVELDT, Roger; GRAY, Rob. Visual Misperception in Aviation: Glide Path Performance in a Black Hole Environment. *Human Factors: The Journal of the Human*



- Factors and Ergonomics Society*. 2008, roč. 50, č. 4, s. 699–711. Dostupné z DOI: 10.1518/001872008x288619.
32. BULKLEY, Nathan K.; DYRE, Brian P.; LEW, Roger; CAUFIELD, Kristin. A Peripherally-Located Virtual Instrument Landing Display Affords More Precise Control of Approach Path during Simulated Landings than Traditional Instrument Landing Displays. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. 2009, roč. 53, č. 1, s. 31–35. Dostupné z DOI: 10.1177/154193120905300108.
33. THOMPSON, Robert C. The “Black Hole” Night Visual Approach: Calculated Approach Paths Resulting From Flying a Constant Visual Vertical Angle to Level and Upslope Runways. *The International Journal of Aviation Psychology*. 2009, roč. 20, č. 1, s. 59–73. Dostupné z DOI: 10.1080/10508410903415989.
34. NICHOLSON, Chris M.; STEWART, Peter C. Effects of Lighting and Distraction on the Black Hole Illusion in Visual Approaches. *The International Journal of Aviation Psychology*. 2013, roč. 23, č. 4, s. 319–334. Dostupné z DOI: 10.1080/10508414.2013.833755.
35. JACOBS, David M.; MORICE, Antoine H. P.; CAMACHON, Cyril; MONTAGNE, Gilles. Eye position affects flight altitude in visual approach to landing independent of level of expertise of pilot. *PLOS ONE*. 2018, roč. 13, č. 5, s. e0197585. Dostupné z DOI: 10.1371/journal.pone.0197585.
36. ROBINSON, F. Eric; WILLIAMS, Henry; HORNING, Dain; BIGGS, Adam T. A Comparative Evaluation of Hypotheses to Explain the Black Hole Illusion. *The International Journal of Aerospace Psychology*. 2020, roč. 30, č. 1-2, s. 54–68. Dostupné z DOI: 10.1080/24721840.2020.1719010.
37. ROBINSON, F. Eric; WILLIAMS, Henry; HORNING, Dain; BIGGS, Adam T. A Comparative Evaluation of Hypotheses to Explain the Black Hole Illusion. *The International Journal of Aerospace Psychology*. 2020, roč. 30, č. 1-2, s. 54–68. Dostupné z DOI: 10.1080/24721840.2020.1719010.
38. FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. Chapter 8. Medical Facts for Pilots. In: *Aeronautical Information Manual: Official Guide to Basic Flight Information and ATC Procedures*. Washington, D.C., USA: Federal Aviation Administration, 2011.



39. SCHIFF, Barry. Visual Illusions Can Spoil Your Whole Day: No matter the size or speed of the aircraft, pilots who find themselves in the dark at low altitudes are subject to the misleading effects of spatial disorientation and other visual pitfalls. *Flight Safety Foundation*. 1990, roč. 47, č. 3. ISSN 0898-5774.
40. LEWIS, M. F.; MERTENS, H. W. Effect of different runway size on pilot performance during simulated night landing approaches. 1981, roč. Report no.: FAA-AM-81-6.
41. GIBB, Randy; GRAY, Rob. Terrain Orientation Theory for a Visual Approach to Landing. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. 2006, roč. 50, č. 16, s. 1661–1665. Dostupné z DOI: 10.1177/154193120605001631.
42. *FOVE 0 Eye Tracking Virtual Reality Devkit User Manual*. 2017. Dostupné také z: [https://archives-fove.s3-ap-northeast-1.amazonaws.com/setup/FOVE0\\_User\\_Manual\\_Eng\\_2021.pdf](https://archives-fove.s3-ap-northeast-1.amazonaws.com/setup/FOVE0_User_Manual_Eng_2021.pdf).
43. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. *Systém pro simulaci řízení dopravních prostředků*. Původci: Socha, Vladimír et al., Česká Republika, Patent: CZ 309007 B6, 2021.
44. *Friedman's test documentation*. Dostupné také z: <https://www.mathworks.com/help/stats/friedman.html>.
45. *EASA approves the First Virtual Reality (VR) based flight simulation training device*. 2021. Dostupné také z: <https://www.easa.europa.eu/newsroom-and-events/press-releases/easa-approves-first-virtual-reality-vr-based-flight-simulation>.
46. CHANG, Ming; HUANG, Lei; YOU, Xuqun; WANG, Pei; FRANCIS, Gregory; PROCTOR, Robert W. The black hole illusion: A neglected source of aviation accidents. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 2022, roč. 87, s. 103235. Dostupné z DOI: 10.1016/j.ergon.2021.103235.