



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní
Ústav letecké dopravy

Porovnání vypočtených a dosahovaných výkonů při přistání
Calculated and Measured Landing Performance Data: A comparison
Study

Bakalářská práce

Studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojích

Studijní obor: PIL – Profesionální pilot

Vedoucí práce: Ing. Viktor Valenta

Martin Krása

Praha 2022

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

děkan

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



K621.....Ústav letecké dopravy

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Martin Krása

Studijní program (obor/specializace) studenta:

bakalářský –PIL– Profesionální pilot

Název tématu (česky): **Porovnání vypočtených a dosahovaných výkonů při přistání**

Název tématu (anglicky): **Calculated and Measured Landing Performance Data: A Comparison Study**

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je zhodnotit rozdíly mezi publikovanou délkou přistání letadla a délkou přistání dosahovanou v běžném provozu.
- Vykonejte analýzu současného stavu zaměřenou na stanovení délky přistání.
- Navrhněte a realizujte experiment, prostřednictvím něhož bude možné stanovit rozdíly mezi publikovanou délkou přistání letadla a délkou přistání dosahovanou v běžném provozu.
- Získaná data vyhodnoťte prostřednictvím vhodných metod.
- Výsledky interpretujte a diskutujte.
- Formulujte závěry, limitace práce a případně doporučení.



- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího bakalářské práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: Eshelby, Martin E. 2000. Aircraft Performance: Theory and Practice. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
Pytka et al. 2019. "Application of gnss/ins and an Optical Sensor for Determining Airplane Takeoff and Landing Performance on a Grassy Airfield." Sensors 19 (24).

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Viktor Valenta**

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

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

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



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

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Martin Krása
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 8. října 2021



Abstrakt

Znalost stanovení délky přistání je jednou ze základních pilířů předletové přípravy pilota. Za současného stavu je možné tyto výkonnostní charakteristiky u letounu Cessna 172S vypočítat z letové příručky, kde jsou hodnoty naměřeny testovacími piloty pomocí speciální techniky přistání na krátkou dráhu. Této techniky se však za běžného provozu nevyužívá, protože je náročnější z hlediska pilotáže. Lze tedy předpokládat, že za běžného provozu budou tyto hodnoty delší. Rozdíly těchto vzdáleností pak mohou být důležité a kritické zejména na kratších dráhách, a zvláště pak v průběhu výcviku nových pilotů, kteří nemají dostatečnou zkušenost s daným modelem letounu. Cílem této studie je tedy porovnat hodnoty uvedené výrobcem s naměřenými délkami přistání za normálního provozu a stanovit tak koeficient, který bude sloužit k efektivnějšímu a přesnějšímu stanovení očekávané délky pro přistání.

Klíčová slova: analýza, dojezd, délka přistání, výkonnost letounu



Abstract

The knowledge of landing distance is one of the basic pillars of the pre-flight planning for pilots. As it stands, these performance data for the Cessna 172S aircraft can be calculated from Pilot's Operating Handbook, where the values are measured by test pilots using a special short field landing technique. However, this technique is not used in normal operations because it is more demanding from a piloting perspective. It can be assumed that in normal operation these values will be longer. Differences in these distances may then be important and critical, particularly on shorter runways and especially during the training of new pilots who are not sufficiently experienced with the aircraft model in question. The aim of this study is to compare the values specified by the manufacturer with measured landing distances in normal operation to establish a coefficient that will be used to determine the expected landing distances with higher efficiency and accuracy.

Keywords: analysis, ground roll, landing distance, aircraft performance



Poděkování

Rád bych touto formou poděkoval především hlavnímu technikovi z výcvikového střediska Michalu Frajerovi za poskytnutí všech záznamů z jejich letounů. Velké poděkování také patří Ing. Viktoru Valentovi za konzultování a odborné vedení práce.



Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem Porovnání vypočtených a dosahovaných výkonů při přistání vypracoval samostatně a použil k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k bakalářské 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).

V Praze dne 7. srpna 2022

.....
Podpis



Obsah

ÚVOD	15
1.1 MOTIVACE A CÍLE	15
2 TEORETICKÉ ZÁKLADY PRÁCE.....	16
2.1 LETECKÉ ORGANIZACE	17
2.1.1 ICAO.....	17
2.1.2 EASA.....	18
2.2 LEGISLATIVA VÝKONNOSTNÍCH POŽADAVKŮ	19
2.2.1 Nařízení Komise (EU) č. 965/2012.....	19
2.2.2 Annex 8 – Letová způsobilost letadel.....	21
2.3 ZÁKLADNÍ POJMY A DEFINICE	21
2.3.1 Letadlo a letoun	21
2.3.2 Složitě motorové letadlo a jiné než složitě motorové letadlo	22
2.3.3 Druhy provozu letadel.....	22
2.3.4 Výkonnostní třídy letounů	23
2.3.5 Dráhový systém	23
2.3.6 Vyhlášené délky drah	23
2.4 AERODYNAMIKA.....	24
2.4.1 Síly působící na letoun při přistání	26
3 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU	32
3.1 LETOVÁ PŘÍRUČKA.....	32
3.1.1 Nástroje pro výpočet výkonnosti.....	32
3.2 FÁZE PŘISTÁNÍ	33
3.3 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ VÝKONNOST PŘI PŘISTÁNÍ	34
3.4 POPIS PŘISTÁNÍ ZA POUŽITÍ METODY „SHORT FIELD“.....	35
3.5 POPIS PŘISTÁNÍ BEZ POUŽITÍ METODY „SHORT FIELD“	36
4 REALIZACE EXPERIMENTU	37
4.1 PROSTŘEDKY VYUŽITÉ PRO EXPERIMENT	37
4.1.1 Popis letounu Cessna 172S	37
4.1.2 Garmin G1000	38
4.1.3 Garmin GLO2.....	39
4.2 POPIS VYUŽÍVANÝCH LETIŠŤ	39



4.3	IDENTIFIKACE DRÁHY	40
4.4	POSTUP PRO ZJIŠTĚNÍ NAMĚŘENÝCH DÉLEK PŘISTÁNÍ	40
4.4.1	<i>Sběr dat</i>	40
4.4.2	<i>Vstupní parametry</i>	40
4.4.3	<i>Selekce dat</i>	41
4.4.4	<i>Výpočet decelerace a délky pro úplné zastavení</i>	42
4.5	POSTUP PRO ZJIŠTĚNÍ VYPOČTENÝCH DÉLEK PŘISTÁNÍ	43
4.5.1	<i>Postup výpočtu</i>	43
4.6	SEZNAM VYŘAZENÝCH LETŮ	46
5	VÝSLEDKY VYHODNOCENÍ VŠECH LETŮ	49
5.1	POROVNÁNÍ HODNOT DOJEZDU	49
5.2	POROVNÁNÍ HODNOT CELKOVÉHO PŘISTÁNÍ	51
6	DISKUSE	54
7	ZÁVĚR	55
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJE	57



Seznam obrázků

Obrázek 1: Počet nehod obchodní letecké dopravy dle fází letu [2]	16
Obrázek 2: Schéma evropské legislativy a základních dokumentů EASA [4].....	19
Obrázek 3: Vyhlášené délky pro vzlet a přistání [11].	24
Obrázek 4: Laminární a turbulentní proudění [18].....	25
Obrázek 5: Rozložení aerodynamických sil působících na letadlo [15].....	26
Obrázek 6: Rozložení sil při klesání [14]	30
Obrázek 7: Monogram [19]	32
Obrázek 8: Grafické zobrazení fází přistání [14].....	34
Obrázek 9: Garmin G1000 (PFD, MFD) [13].....	38
Obrázek 10: Mapa letiště LKHK [23]	39
Obrázek 11: Souhrn všech dat z G1000 [13]	40
Obrázek 12: Graf porovnání délek dojezdu	49
Obrázek 13: Bodový graf porovnání délek dojezdu	49
Obrázek 14: Graf četnosti rozdílů délek dojezdu	50
Obrázek 15: Rozdíly délek dojezdu v krabicovém diagramu	50
Obrázek 16: Graf porovnání délek celkového přistání	51
Obrázek 17: Bodový graf porovnání délek přistání	51
Obrázek 18: Graf četnosti rozdílů délek přistání	52
Obrázek 19: Rozdíly délek přistání v krabicovém diagramu	52



Seznam tabulek

Tabulka 1: Hodnoty pro stoupání [19].....	33
Tabulka 2: Tabulka přistávací výkonnosti letounu Cessna 172S [19]	44
Tabulka 3: Vyřazený let č. 1.....	46
Tabulka 4: Vyřazený let č. 2.....	46
Tabulka 5: Vyřazený let č. 3.....	47
Tabulka 6: Vyřazený let č. 4.....	47
Tabulka 7: Vyřazený let č. 5.....	48
Tabulka 8: Vyřazený let č. 6.....	48
Tabulka 9: Souhrn všech výsledků	53



Seznam symbolů a zkratek

%	Procento (gradient) – Percent (gradient)
°C	Stupeň Celsia – Degree Celsius
AIP	Letecká informační příručka – Aeronautical information publication
AMC	Přijaté způsoby průkazu – Acceptable means of compliance
AOC	Oprávnění leteckého provozovatele – Air operator certificate
ARO	Požadavky na úřady v oblasti letového provozu – Authority requirements for air operations
ASDA	Použitelná délka přerušeného vzletu – Accelerate-stop distance available
ATO	Schválená organizace pro výcvik – Approved training organization
BEW	Základní prázdná hmotnost – Basic empty weight
CAT	Obchodní letecká doprava – Commercial air transport
CS	Certifikační specifikace – Certification specification
CWY	Předpolí – Clearway
ČR	Česká republika – Czech Republic
DTHR	Posunutý práh dráhy – Displaced threshold
EASA	Evropská agentura pro bezpečnost letectví – European aviation safety agency
EFIS	Elektronický letový informační systém – Electronic flight information system
ES	Evropské společenství – European communities
EU	Evropská unie – European union
FC	Letová posádka – Flight crew
FLT	Letový čas a čas ve službě – Flight time and duty time
ft	Stopa (měrová jednotka) – Feet (dimensional unit)
GEN	Obecné – General
GM	Poradenský materiál – Guidance material
GNSS	Globální družicový navigační systém – Global navigation satellite system
GPS	Globální polohový systém – Global positioning system
GS	Rychlost vůči zemi – Ground speed
HDG	Kurz – Heading
HW	Čelní vítr – Headwind
ICAO	Mezinárodní organizace pro civilní letectví – International civil aviation organization
IFR	Pravidla pro let podle přístrojů – Instrument flight rules
inHg	Palec rtuťového sloupce – Inch of mercury
IR	Prováděcí pravidla – Implementing rules



km/h	Kilometr za hodinu – Kilometer per hour
kt	Uzel – Knot
lb	Libra – Pound
LDA	Použitelná délka přistání – Landing distance available
LVO	Provoz za podmínek nízké dohlednosti – Low visibility operations
m	Metr – Meter
m/s	Metr za sekundu – Meter per second
MFD	Multifunkční displej – Multi-function display
MOPSC	Maximální provozní konfigurace sedadel pro cestující – Maximum operational passenger seating configuration
MTOW	Maximální vzletová hmotnost – Maximum take-off weight
MTW	Maximální hmotnost pro pojíždění – Maximum taxi weight
NCC	Neobchodní provoz složitých motorových letadel – Non-commercial operations with complex motor-driven aircraft
NCO	Neobchodní provoz jiných než složitých motorových letadel – Non-commercial operations with other than complex motor-powered aircraft
OPS	Letový provoz – Aircraft operations
ORO	Požadavky na provozovatele v oblasti letového provozu – Organisations requirements for air operations
OSN	Organizace spojených národů – United nations
PBN	Navigace založená na výkonnosti
PFD	Primární displej – Primary flight display
POH	Provozní příručka pilota – Pilot's operating handbook
QNH	Tlak vzduchu přepočtený na hladinu moře
RPM	Otáčky za minutu – Revolutions per minute
RVSM	Snížené minimum vertikálního rozstupu – Reduced vertical separation minimum
RWY	Vzletová a přistávací dráha – Runway
SARP	Standardy a doporučené postupy – Standards and recommended practices
SEC	Zabezpečení – Security
SM	Management bezpečnosti – Safety management
SOP	Standartní operační postupy – Standard operating procedures
SPA	Zvláštní opatření – Specific approvals
SWY	Dojezdová dráha – Stopway
TAS	Pravá vzdušná rychlost – True air speed



THR	Práh dráhy – Threshold
TODA	Použitelná délka vzletu – Take-off distance available
TORA	Použitelná délka rozjezdu – Take-off run available
TW	Zadní vítr – Tailwind
U.S. Gal	Americký galon – United States Gallon
VFR	Pravidla pro let za viditelnosti – Visual flight rules



Úvod

Bakalářská práce na téma *Porovnání vypočtených a dosahovaných výkonů při přistání* se zaměřuje na výkonnostní charakteristiky u letounu Cessna 172 a je prezentovaná v závěrečné části studia bakalářského oboru Profesionální pilot vyučovaného na Fakultě dopravní ČVUT v Praze. Náplní této práce je porovnat skutečně dosahované délky pro přistání s údaji, které jsou publikované v příručce letounu.

Celá práce je logicky strukturovaná dle postupu autora od základního uvedení do problému a legislativního základu pro práci. Dále se již zabývá pouze tématem výkonnosti a analýzou současného stavu pro zjišťování délek přistání. Jedna část je věnována čistě popisu letounu, na kterém byl experiment proveden, a jeho zařízení pro zapisování letových údajů. V praktické části je uveden celý postup práce s naměřenými daty od selekce, na základě stanovených parametrů a jejich následného zpracování, až po jejich porovnání s hodnotami vypočtenými z příručky letounu. V návaznosti na tyto výsledky je v závěru uvedeno jejich zhodnocení a možné limitující faktory, které mohly zapříčinit jejich sníženou přesnost.

1.1 Motivace a cíle

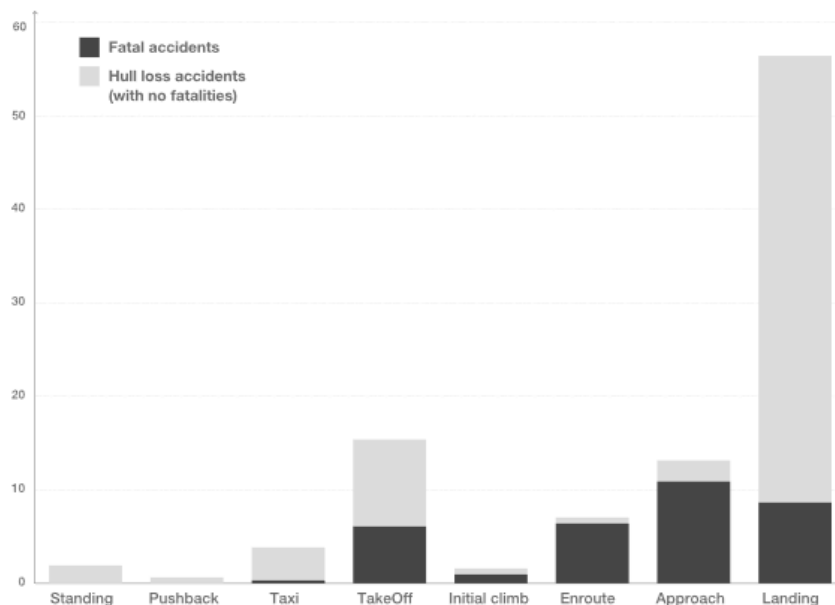
Výpočet očekávaných délek pro přistání je jedním ze základních pilířů předletové přípravy pilota a je tak velmi důležitou částí pro zajištění bezpečnosti. Pilot by s těmito údaji měl být obeznámen a je přímo zodpovědný za správnost těchto výpočtů. Nicméně údaje, které jsou publikovány výrobcem v příručce letounu Cessna 172S jsou měřeny pomocí speciální metody a za ideálních podmínek zkušenými testovacími piloty. To by za běžného provozu, zvláště pak v průběhu výcviku nových pilotů, mohlo vést k podcenění těchto hodnot, a vyústit tak až k nehodě. Tudíž snahou této práce je stanovit určitý koeficient, který vznikne na základě porovnání hodnot naměřených za běžného provozu s hodnotami vypočtenými z příručky letounu. Pomocí něho by tak piloti byli obeznámeni se skutečně dosahovanými délkami přistání za normálního provozu. Tím by se pak i časově zefektivnila předletová příprava a zajistila vyšší bezpečnost provozu.

2 Teoretické základy práce

Tato kapitola slouží jako úvod do problematiky výkonnosti v letectví. Její obsah se bude věnovat teoretickým základům sloužícím k pochopení dané problematiky a také platným předpisům a nařízením (světových i evropských). Tudíž čtenář by po prostudování této kapitoly měl být schopen porozumět všem navazujícím problémům této práce.

V letectví se přihlíží především na bezpečnost, a to s mnohem větším důrazem, než jak je tomu u jiných typů dopravy. Tento přístup je pochopitelný, jelikož dochází k přepravě velkého počtu pasažérů, kterým musí být poskytnuto maximální pohodlí a bezpečnost v průběhu celého letu. K měření bezpečnosti se využívá tzv. *rizikovost*, která je odlišná v každé fázi letu. Za nejkritičtější fázi se poté považuje vzlet a přistání. To je zřejmé i z nařízení, kterou uvádí Komise Evropské unie č. 965/2012, též známá jako EASA AIR OPS, kde se přímo uvádí tato tvrzení: „Kritickou fází letu se v případě letounů rozumí rozjezd, dráha letu při vzletu, konečné přiblížení, nezdařené přiblížení, přistání, včetně dojezdu a všechny ostatní fáze letu podle rozhodnutí velícího pilota nebo velitele letadla“ [1].

To také vychází z Obr. 1, ve které můžeme vidět, že skutečně nejnebezpečnější fází letu je přistání [2]. S postupným vývojem letectví se množství leteckých nehod snižuje. To zapříčinil zejména rozvoj Safety Managementu, který do letectví zanesl velké množství bezpečnostních doporučení, která upravují pravidla pro létání, plánování letu, ale také výcviky posádek.



Obrázek 1: Počet nehod obchodní letecké dopravy dle fází letu [2]

V dalších kapitolách také podrobněji rozeberu problematiku v předpisech a nařízeních, která jsou nutná pro stanovení pravidel a tím zajištění bezpečnosti.



2.1 Letecké organizace

Vydávání leteckých předpisů a nařízení zajišťují pověřené organizace, kterými se musí každý ze členských států řídit.

2.1.1 ICAO

ICAO vzniklo na základě Chicagské úmluvy, k čemuž se váže vznik 19 příloh, též zvaných jako *annexy*. V těchto předpisech byly uvedeny standardy a doporučení pro mezinárodní civilní letecký provoz. Standardy si měl poté každý z členských států zařadit do svých národních zákonů. Doporučení ale nebyla nadřazena národním zákonům, a v případě, že se stát rozhodne je nepřijmout, je povinen publikovat všechny rozdíly v národním AIP. V České republice byly standardy a doporučení částečně předělány v podobě předpisů L, kterých je také celkem 19. Pro úplnost doplňuji konkrétní názvy všech *Annexů* níže:

- Annex 1 – Personnel Licensing
- Annex 2 – Rules of the Air
- Annex 3 – Meteorological Services
- Annex 4 – Aeronautical Charts
- Annex 5 – Units of Measurement
- Annex 6 – Operation of Aircraft
- Annex 7 – Aircraft Nationality and Registration Marks
- Annex 8 – Airworthiness of Aircraft
- Annex 9 – Facilitation
- Annex 10 – Aeronautical Telecommunications
- Annex 11 – Air Traffic Services
- Annex 12 – Search and Rescue
- Annex 13 – Aircraft Accident and Incident Investigation
- Annex 14 – Aerodromes
- Annex 15 – Aeronautical Information Services
- Annex 16 – Environmental Protection
- Annex 17 – Security
- Annex 18 – The Safe Transportation of Dangerous Goods by Air
- Annex 19 – Safety Management [3]



Motivace pro vznik této společnosti je patrná z faktu, že lety v civilní letecké dopravě jsou především mezistátní, tedy i za hranice každého státu. Tudíž je vhodné vytvořit rámec pravidel a pokrýt tak, co největší možnou oblast světa. Tím mohou být pravidla sjednocena pro jejich přehlednost [6].

Hlavním úkolem této společnosti je rozvoj v odvětví mezinárodního letectví, zajištění bezpečnosti a sjednocení pravidel a postupů [6].

2.1.2 EASA

Dne 28.9. 2003 byla na základě nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1592/2002 zřízena společná pravidla v oblasti civilního letectví a Článkem 12 tohoto nařízení vznikla organizace pod názvem Evropská agentura pro bezpečnost v letectví – EASA. Ta napomáhá Evropské komisi s přípravou opatření, která mají být přijata pro provedení nařízení č. 1592/2002. EASA sídlí od 3.11. 2004 v Kolíně nad Rýnem a sjednocuje tak 32 členských států, z nichž je 28 zemí také členy Evropské unie. Zbývajících členy je Norsko, Lichtenštejnsko, Švýcarsko a Island. V čele této organizace je výkonný ředitel, kterým je od roku 2013 Patrick Ky [5].

Jako hlavní činností této organizace je především dohled nad zaváděním a dodržováním všech legislativních požadavků, které byly zavedeny. Dále pak také dohled nad oblastí certifikace letadel a nad výrobci a organizacemi pro údržbu [4].

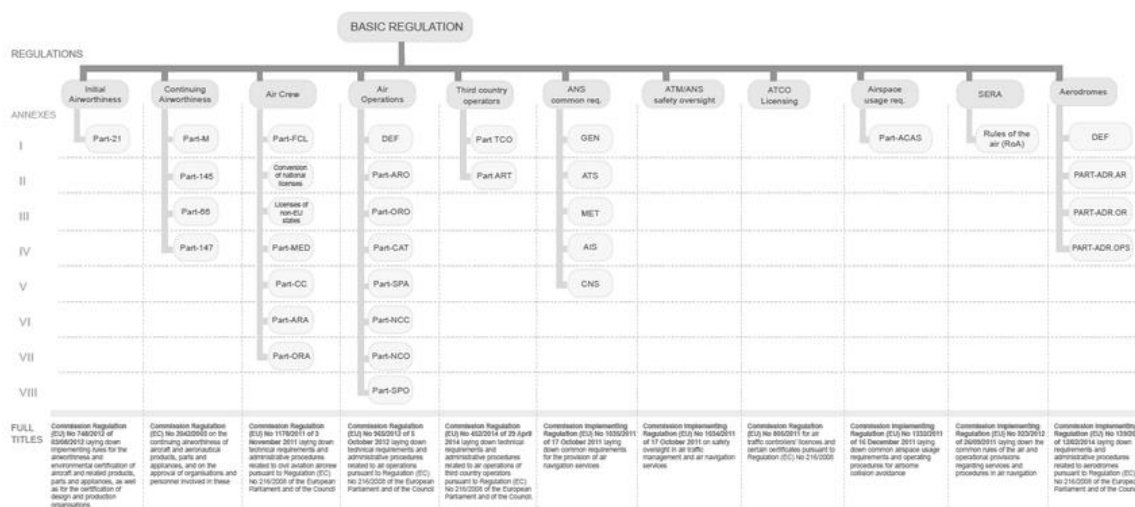
K prvnímu rozšíření došlo na základě nařízení ES č. 216/2008, které se týkalo způsobilosti leteckého personálu a leteckého provozu. K druhému rozšíření došlo roku 2009 (nařízení (ES) č. 1108/2009), které regulovalo uspořádání letového provozu a letových navigačních služeb a letišť [4].

Na tvorbě Evropské legislativy se podílí tři základní subjekty: Evropská komise, výkonný ředitel EASA a Evropský parlament. Nařízení je nejprve vydáno Evropským parlamentem, k němuž stanovuje Evropská komise konkrétní pravidla, tzv. Implementing rules (IR), která jsou po vyhlášení v Úředním listu závazná pro všechny členské státy, jedná se o tzv. *Hard Law*. Tato nařízení mají následně přednost před národními předpisy členských států [4].

Současně jsou stanovena pravidla ve formě rozhodnutí výkonného ředitele EASA. Jedná se o přijaté způsoby průkazu AMC, výkladový materiál GM a certifikační specifikace CS. Předmětné dokumenty napomáhají k jednodušší orientaci v požadavcích a k jejich dovysvětlení. Nemají závazný charakter a jedná se tedy o tzv. *Soft Law* [4].

Hlavním cílem této organizace je dle nařízení (ES) č. 216/2008 následující: „Hlavním cílem tohoto nařízení je dosažení a udržení vysoké a jednotné úrovně bezpečnosti civilního letectví v Unii.“ Jako další cíle EASA uvádí například:

- Usnadnění volného pohybu osob, zboží, služeb a kapitálu a zajištění jejich konkurenceschopnosti a rovných podmínek.
- Rozšíření v politice a výkonnosti civilního letectví v Unii.
- Navázání spolupráce se státy třetího světa jejich leteckými úřady.
- Podpora důvěry cestujících v civilní letecké dopravě.
- Přispívání k ochraně životního prostředí [4].



Obrázek 2: Schéma evropské legislativy a základních dokumentů EASA [4]

2.2 Legislativa výkonnostních požadavků

V této kapitole se už budu konkrétně věnovat legislativě stanovující výkonnostní požadavky. Uvedu zde základní dokumenty vydané organizací EASA.

2.2.1 Nařízení Komise (EU) č. 965/2012

Toto konkrétní nařízení, též zvané jako AIR OPS, stanovuje technické požadavky a správní postupy týkající se letového provozu dle nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č.216/2008. Předpis se původně skládal z pouze pěti annexů, ale na základě pozměňovacích nařízení Komise (EU) č. 800/2013 a č. 379/2014 došlo k rozšíření pravidel pro neobchodní leteckou dopravu a podmínky a postupy pro provozovatele zabývající se neobchodní leteckou dopravou složitých motorových letadel (NCC) a letadel jiných než složitých motorových letadel



(NCO). V současné době je tedy předpis složen z celkem osmi annexů a deseti článků. Součástí je tedy Annex 1, Annex 2 (PART-ARO), Annex 3 (PART-ORO), Annex 4 (PART-CAT), Annex 5 (PART-SPA), Annex 6 (PART-NCC) a Annex 7 (PART-NCO) [7].

PART-ARO (Authority requirements for air operations) vychází z annexu 2. Skládá se z částí GEN, OPS a RAMP a věnuje se tedy povinnostem úřadů, například uchováváním záznamů, osvědčováním a vyučováním [7].

PART-ORO (Organisations requirements for air operations) je Annex 3 k nařízení Evropské komise č. 965/2012. Obecně se jedná o dokument pro provozovatele, kterým klade požadavky pro komerční leteckou dopravu. Skládá se z částí GEN, ORO, AOC (Air operator certification), FLT (Flight time and duty time limitations and rest requirements), SEC (Security), FC (Flight crew) a dalších. U provozovatelů se poté sledují jejich manuály, výcvikové standardy, provozní postupy, používání MEL (Minimum equipment list), dangerous goods, management a další [7].

PART-CAT (Commercial air transport operations), který vychází z annexu 4 se věnuje povinnostem provozovatelů, kteří se řadí do obchodní letecké dopravy. Věnuje se jak letadlům, tak i vrtulníkům. Jsou zde definované jednotlivé výkonnostní požadavky, které musí letadlo splňovat pro určitý let. Jsou zde také popsány obecné požadavky pro lety, které spadají do této kategorie, dále také provozní postupy a požadavky na přístrojové vybavení a další [7].

PART-SPA (Operations requiring specific approvals) vychází z annexu 5. V tomto dokumentu jsou sepsány požadavky pro provoz se speciálním povolením, například RVSM (Reduced vertical separation minima), PBN (Performance based navigation), LVO (Low visibility operation) a další [7].

PART-NCC (Non-commercial operations with complex-motor-powered aircraft) vychází z annexu 6 a klade zde požadavky pro provozovatele neobchodní letecké dopravy se složitým motorovým letadlem [7].

PART-NCO (Non-commercial operations with other than complex-motor-powered aircraft) je předpis, který vychází z annexu 7. Klade zde požadavky pro provozovatele neobchodní letecké dopravy s jiným než složitým motorovým letadlem [7].

AIR OPS jsou tedy předpisem, kterým by měl být obeznámen každý zodpovědný aviatik. Nejdůležitějšími informacemi jsou pak zejména:

- Specifická pravidla v závislosti na složitosti letadla.



- Dělení letounů dle jejich výkonnostních tříd.
- Pravidla pro jednotlivý typ provozu.
- Pravidla pro výpočet hmotnosti a vyvážení.

2.2.2 Annex 8 – Letová způsobilost letadel

Annex 8 je dokument vydaný již zmíněnou společností ICAO. Na základě standardů a doporučení z tohoto předpisu vydalo Ministerstvo dopravy ČR předpis L8, který je platný pouze na území našeho státu. Annex 8 a předpis L8 se věnují problematice letové způsobilosti letadel a uvádí zde výkonnostní požadavky [8] [20].

2.3 Základní pojmy a definice

Pro správné pochopení problematiky je nezbytné definovat jednotlivé pojmy, se kterými se v letectví setkáme. Zde uvedu několik nejdůležitějších definic, které jsou využívány v odvětví výkonnosti letadel.

2.3.1 Letadlo a letoun

Pro základní pochopení je nutné si nejprve stanovit, jakým létajícím prostředkem se ve své práci budu zabývat. Přesné definice těchto prostředků jsou k nalezení v předpisu Annex 2 – Pravidla létání a Annex 6 – Provoz letadel.

- **Letadlo** (Aircraft) – je zařízení schopné vyvozovat síly nesoucí jej v atmosféře z reakcí vzduchu, které nejsou reakce vůči zemskému povrchu [9]. Do této skupiny můžeme také zařadit na základě předpisu L8 i dálkově ovládaná letadla. Tento pojem je obecně nadřazený slovu letoun, zahrnuje v sobě letouny, kluzáky i vrtulníky.
- **Letoun** (Aeroplane) – je letadlo těžší než vzduch s pohonem, vyvozující vztlak za letu hlavně z aerodynamických sil na plochách, které za daných podmínek zůstávají vůči letadlu nepohyblivé [9].

Ze znalosti toho, že letoun, je letadlo těžší než vzduch s pohonem, který vyvozuje vztlak hlavně na základě aerodynamických sil, můžeme nyní tvrdit, že letadlo Cessna 172S, na kterém byl měřen experiment, je i letoun. Toto je pouze základní rozdělení létajících prostředků, dále bychom mohli náš letoun zařadit do skupiny letounů s motorem a nepohyblivými nosnými



plochami. Dělení všech ostatních létajících prostředků není předmětem této práce, tudíž se jimi nebudu zabývat.

2.3.2 Složitě motorové letadlo a jiné než složitě motorové letadlo

Složitě motorové letadlo je definováno v Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) 216/2008. Letadla musí splňovat tyto následující pravidla:

- MOPSC je 19 nebo více.
- Maximální certifikovaná vzletová hmotnost je 5700 kg nebo více.
- Je uzpůsoben pro provoz minimálně se dvěma piloty.
- Je vybaveno jedním nebo více proudovými motory, nebo více než jedním turbovrtulovým motorem [12].

Jelikož letoun Cessna 172S tedy nesplňuje uvedené výše podmínky, řadí se proto mezi jiná než složitě motorová letadla.

2.3.3 Druhy provozu letadel

Pro rozdělení podmínek pro každý typ provozu je nejprve potřeba definovat tyto druhy provozu, jelikož například na obchodní leteckou dopravu je nahlíženo přísněji než na neobchodní leteckou dopravu. Dle Nařízení komise (EU) č. 965/2012 existují tyto druhy provozu:

- **Obchodní provoz** – tím se rozumí jakýkoli provoz letadla za úplatu nebo jinou protihodnotu, který je přístupný veřejnosti, nebo pokud není přístupný veřejnosti, je prováděn na základě smlouvy mezi provozovatelem a zákazníkem [1].
- **Zvláštní provoz** – jakýkoli jiný provoz než provoz v obchodní letecké dopravě, kdy je letadlo použito pro zvláštní činnost, jako je výstavba, zemědělství, snímkování, průzkum, pozorování a hlídkování, letecká reklama a kontrolní lety po údržbě [1].
- **Neobchodní provoz** – tím rozumíme jakýkoli jiný provoz, který nespadá pod definici obchodního provozu [1].

V této práci se budu zabývat pouze požadavky a výkonností letounů, které spadají do skupiny neobchodního leteckého provozu. Konkrétně pak na neobchodní letecký provoz jiným než složitým motorovým letadlem, jelikož těmito požadavky se řídí výcvikové lety s letounem Cessna 172S.



2.3.4 Výkonnostní třídy letounů

Dle EASA AIR OPS dělíme letouny dle výkonnosti do třech základních tříd:

- **Výkonnostní třída A** – tím se rozumějí vícemotorové letouny poháněné turbovrtulovými motory s MOPSC větší než 9 nebo s maximální vzletovou hmotností větší než 5 700 kg a dále všechny vícemotorové proudové letouny [7].
- **Výkonnostní třída B** – tím se rozumějí letouny poháněné vrtulovými motory s MOPSC 9 nebo méně a maximální vzletovou hmotností 5 700 kg nebo méně [7].
- **Výkonnostní třída C** – tím se rozumějí letouny poháněné pístovými motory s MOPSC větší než 9 nebo s maximální vzletovou hmotností větší než 5 700 kg [7].

2.3.5 Dráhový systém

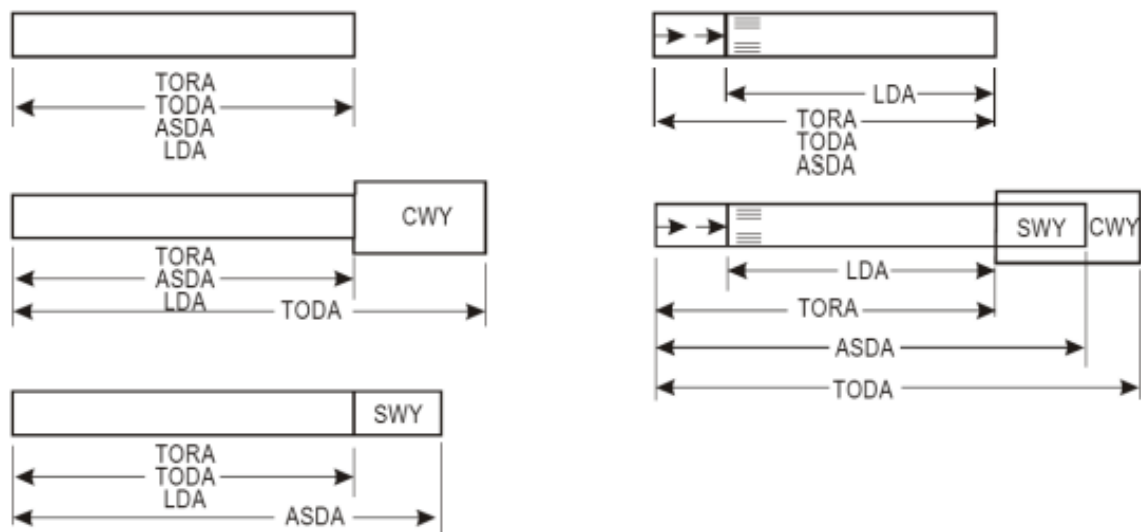
Zde budu vycházet ze základních předpisů L, které jsou vyhlášeny v Letecké informační příručce. Zejména se budu obracet na předpis L-14, který se podrobně zabývá problematikou letišť.

- **Dráha (RWY)** – vymezená pravoúhlá plocha na pozemním letišti upravená pro přistání a vzlety letadel [11].
- **Práh dráhy (THR)** – začátek té části RWY, která je použitelná pro přistání [11].
- **Předpolí (CWY)** – pravoúhlá plocha na zemi nebo na vodě, vymezená pod dohledem ÚCL, vybraná nebo upravená jako použitelná plocha, nad níž může letoun provést část svého počátečního stoupání do předepsané výšky [11].
- **Dojezdová dráhy (SWY)** – vymezená pravoúhlá plocha na zemi navazující na konec použitelné délky rozjezdu upravená tak, aby na ní mohlo letadlo zastavit při přerušeném vzletu [11].
- **Posunutý práh dráhy (DTHR)** – práh umístěný jinde než na začátku RWY [11].

2.3.6 Vyhlášené délky drah

Jedná se o přesně vyhlášené délky, jejich znalost je pro pilota naprosto klíčová z hlediska výkonnosti. Jejich rozměr a způsob jejich uspořádání může být odlišný na každém letišti dle potřeby. Zde budu opět vycházet z předpisu L14, k jednotlivým definicím připojím i jejich grafické znázornění, viz. Obr. 3.

- **Použitelná délka rozjezdu (TORA)** – délka RWY, která je vyhlášena za použitelnou a vhodnou pro rozjezd letounu při vzletu [11].
- **Použitelná délka vzletu (TODA)** – použitelná délka rozjezdu zvětšená o délku předpolí, pokud je zřízena [11].
- **Použitelná délka přerušeno vzletu (ASDA)** – použitelná délka rozjezdu zvětšená o délku dojezdové dráhy, pokud je zřízena [11].
- **Použitelná délka přistání (LDA)** – délka RWY, která je vyhlášena za použitelnou a vhodnou pro dosednutí a dojezd přistávacího letounu [11].

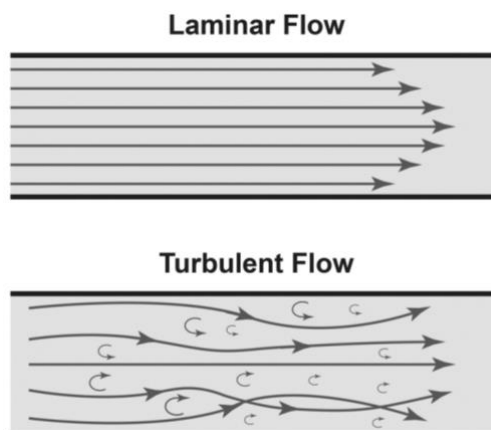


Obrázek 3: Vyhlášené délky pro vzlet a přistání [11].

2.4 Aerodynamika

V této kapitole se budu věnovat popisu aerodynamiky, což je specifické odvětví fyziky, které se zabývá dynamickým působením vzduchu při obtékání těles a vysvětluje tak principy letu letadel těžších než vzduch. Zejména se zaměřím na aerodynamiku malých rychlostí (tedy do rychlosti obtékání přibližně 600 km/h). Tím také budu považovat vzduch za ideální tekutinu, a považuji ji tedy za nestlačitelnou s velmi malou viskozitou.

Proudění vzduchu se dělí na laminární, které je téměř rovnoběžné a na turbulentní, při kterém se vytváří víry. Vše se poté znázorňuje pomocí tzv. proudnic, které popisují trajektorii částic vzduchu [17].



Obrázek 4: Laminární a turbulentní proudění [18]

Základním vztahem je Bernoulliho rovnice, která vyjadřuje zákon o zachování energie proudícího vzduchu v proudové trubici a je dána vztahem:

$$p + q = konst.$$

(1)

Statický tlak (p) – tlak působící na těleso kolmo na jeho povrch a je výsledkem tíhy vzduchové hmoty. Dynamický tlak (q) – tlak působící ve směru pohybu a souvisí s pohybovou energií proudícího vzduchu. Po rozepsání rovnice, tak dostaneme tvar:

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

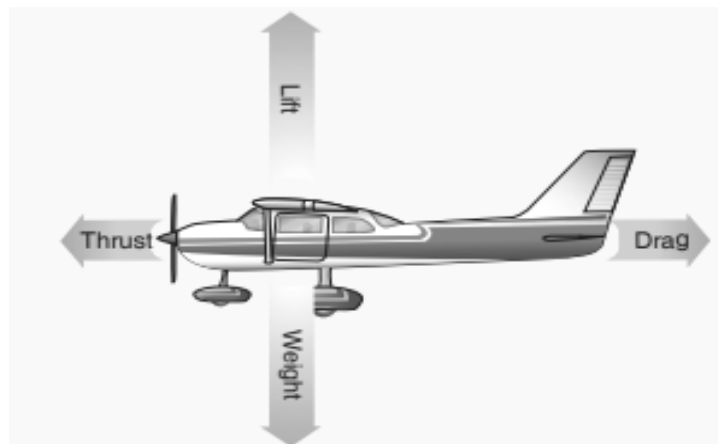
(2)

Z čehož vyplývá, že při zúžení trubice (zhuštění proudnic) dochází ke zvýšení rychlosti vzduchu, a tedy ke zvýšení kinetické energie. Tím odpovídajícím způsobem musí klesnout tlak statický, protože celková energie je konstantní [17].

Při obtékání křídla dochází na horní straně vlivem nárůstu tloušťky křídla ke zhuštění proudnic a tím je horní strana profilu křídla obtékána vyšší rychlostí. Opačně je tomu na spodní straně profilu, kde jsou částice zpomalovány. Tento jev zapříčiní vznik podtlaku na horní straně profilu a přetlaku na spodní straně profilu [17].

2.4.1 Síly působící na letoun při přistání

Na letoun působí za letu čtyři základní druhy sil: vztlak, odpor, tíha a tah. Pochopením toho, jak tyto síly fungují a jak se mění jejich rozložení v průběhu letu, je základem aerodynamiky letu. V ustáleném vodorovném letu je považujeme za rovnoměrné, tudíž součet protikladných sil je vždy roven nule [17].



Obrázek 5: Rozložení aerodynamických sil působících na letadlo [15]

- **Tah** (Thrust) – dopředná síla, která je vytvářena motorem a působí proti odporu letadla. U vrtulových motorů dochází k urychlení velkého množství vzduchu a u proudových naopak menšího množství vzduchu, ale však na mnohem větší rychlost. Obecně jej lze popsat pomocí Newtonových zákonů. Konkrétně 2. Newtonův zákon, stanovuje, že na jakékoliv těleso nebo hmotu, na které působí síla, se pohybuje se zrychlením. To je pak přímo úměrné velikosti působící síly a nepřímo úměrné hmotnosti tělesa [17]. Za předpokladu, že je hmotnost a zrychlení konstantní má tvar:

$$F = m \times a$$

(3)

Kde F je výsledná síla, m je aktuální hmotnost letounu a a je zrychlení



V případě, kdy nelze hmotnost a zrychlení považovat za konstanty, je síla rovna časové změně hybnosti a rovnice má tvar:

$$F = \frac{dp}{dt} = \frac{d(mv)}{dt}$$

(4)

kde p je hybnost, v je rychlost a t je čas.

Dalším ze zákonů, který platí při výpočtu tahu motoru, je 3. Newtonův zákon, též nazývaný jako Zákon akce a reakce, kde tedy obecně platí, že každá akce vyvolá stejně velkou reakci. Tudiž pokud 1. těleso působí na 2. těleso silou o velikosti F , pak působí také 2. těleso na 1. těleso silou F , která je stejně velká ale opačného směru. Obě tyto síly pak současně vznikají a zanikají. Tento zákon lze poté zapsat ve tvaru:

$$\vec{F}_{12} = \vec{F}_{21}$$

(5)

Ve své práci se věnuji pouze letounům s pístovým vrtulovým motorem, tudíž tah vzniká působením vrtule. Pokud pak tyto teorie převedeme na letoun, dochází k urychlování masy vzduchu o dané hmotnosti vlivem působení vrtule, což zapříčiní vznik síly směřující rovnoběžně ve směru proudu vzduchu. Zároveň také vzniká síla v opačném směru (tah), která je stejně velká a na základě ní vzniká dopředný pohyb.

Pro komplexní výpočty tahu motoru u vrtulových letounů je ještě nutné zavést rovnici účinnosti vrtule. Tento vztah se skládá z poměru tahového výkonu a výkonu na hřídeli motoru. Rovnice je po rozepsání těchto proměnných hodnot ve tvaru:

$$\eta = \frac{P_T}{P_H} = \frac{T \times TAS}{M \times RPM}$$

(6)



Kde P_T je tahový výkon, P_H je výkon na hřídeli motoru, T je tah, TAS je pravá vzdušná rychlost, M je točivý moment hřídele a RPM jsou otáčky motoru.

Letoun, se kterým se měřil experiment, je vybaven pevnou vrtulí, tudíž její účinnost je nejvyšší pouze pro jeden režim letu. Kdežto jak je tomu u vrtulí stavitelných, u kterých lze měnit úhel nastavení listů podle provozního režimu. Tím se pak celková účinnost vrtule výrazně zvyšuje.

- **Odpor (Drag)** – síla, která působí proti tahu letadla. Vzniká narušením proudu vzduchu, který obtéká jednotlivé části letadla [17]. Obecným vzorcem lze vypočítat takto:

$$D = \frac{C_D \times \rho \times v^2 \times S}{2}$$

(7)

kde C_D je součinitel odporu, ρ je hustota vzduchu, v^2 je kvadrát pravé vzdušné rychlosti letounu (TAS) a S je plocha.

Aerodynamický odpor se dále dělí na indukovaný a parazitní, který je tvořen odporem třecím, interferenčním a tlakovým.

Parazitní odpor je veličinou, která může být velmi proměnlivá. Jeho velikost je závislá například na pravé vzdušné rychlosti TAS. Tento odpor může být také zvýšen konfigurací letounu, kdy platí, že po vysunutí klapek tento odpor vzroste. Lze jej také vyjádřit pomocí rovnice ve tvaru:

$$D_p = \frac{1}{2} \times \rho \times v^2 \times C_{DP} \times S$$

(8)

Kde D_p je parazitní odpor, ρ je hustota vzduchu, v^2 je kvadrát pravé vzdušné rychlosti TAS, C_{DP} je součinitel parazitního odporu a S je plocha.

Třecí odpor vzniká při tření povrchu letounu s okolní masou vzduchu. Tudíž při konstrukci letadla je kladen důraz na co možná nejhladší povrch. Tento odpor může během letu narůstat vlivem kontaminace. Nejčastěji se jedná o námrazu, která vzniká při dopadu podchlazených vodních kapek na povrch letadla.



Interferenční odpor vzniká jako reakce na vzájemné působení jednotlivých částí letounu. Pilot jej tedy v zásadě nemůže ovlivnit, jelikož je daný pro každý konkrétní model letadla.

Tlakový odpor je poslední částí z parazitního a vzniká následkem působení proudu vzduchu proti letadlu. Tento odpor také narůstá se zvyšující se rychlostí a úhlem náběhu.

Indukovaný odpor vzniká vlivem rozdílu tlaků na horních a spodních stranách profilu. Dochází pak k vytváření vírů na koncích křídel. Tento odpor je přímo úměrný štíhlosti křídel, a tudíž, čím štíhlejší je křídlo, tím menší je jejich indukovaný odpor. Nikdy však není nulový. Také na základě tohoto odporu dochází při přistání k situaci zvané „*ground effect*“, kdy se indukovaný odpor snižuje se snižující se výškou letu, jelikož jsou víry zastaveny zemí. To poté způsobí tendenci letounu nepřistávat, jelikož se zvýší poměr mezi vztlakem a odporem. Pro redukci tohoto odporu se u moderních letadel montují speciální zakončení křídel. Výrobci je pojmenovávají různě, ale nejčastěji používaným názvem tohoto zařízení je winglet.

Kromě výše uvedených druhů odporu bych zde ještě uvedl odpor kol podvozku. Ten především závisí na hmotnosti letounu, tedy s jeho rostoucí hmotností roste i odpor podvozku. Dalším faktorem také může být bezpochyby zahuštění kol podvozku, kdy platí, že menší zahuštění způsobí větší třecí odpor kol s povrchem. Naopak ale nadměrný tlak sice sníží odpor, ale zase se prodlouží brzdná dráha, jelikož se sníží kontaktní plocha kol s povrchem.

Posledním faktorem je pak samotný povrch dráhy a jeho kontaminace. S tím se pojí i změna v jeho součiniteli odporu. Jako příklad zde mohu uvést přistání na travnaté dráze, kdy se valivý odpor kol zvýší, než jak je tomu u přistání na betonových či asfaltových dráhách. Níže uvádím rovnici pro výpočet odporu kol podvozku:

$$D_W = \mu \times (W - L)$$

(9)

Kde D_W je odpor kol podvozku, μ je koeficient tření povrchu, W je tíha letounu a L je vztlak.

- **Vztlak (Lift)** – síla, která vzniká na základě proudění vzduchu kolem profilu křídla a v ustáleném vodorovném letu působí proti síle tíhy letadla [17]. Obecným vzorcem lze vypočítat takto:

$$L = \frac{C_L \times \rho \times v^2 \times S}{2}$$

(10)

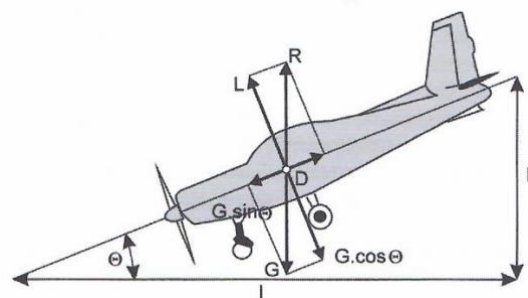
kde C_L je součinitel vztlaku, ρ je hustota vzduchu, v^2 je kvadrát pravé vzdušné rychlosti letounu (TAS) a S je plocha.

Vztlak je vždy kolmý k nabíhajícímu proudu vzduchu a působí směrem nahoru proti tíze letounu z bodu, který se nazývá aerodynamický střed. Součinitel vztlaku je parametr, který je ovlivněn zejména úhlem náběhu a tvarem profilu, který je během letu konstantní a mění se pouze vysunutím prostředků pro zvýšení vztlaku. Vztlak je během klesání popsán následující rovnicí:

$$L = G \times \cos \theta$$

(11)

kde G je tíha letounu a θ je úhel klesání.



Obrázek 6: Rozložení sil při klesání [14]

- **Tíha (Weight)** – síla, která je součtem zatížení celkové hmotnosti letounu, včetně hmotnosti posádky, zavazadel a paliva [17]. Nicméně u malých letadel, jako je například Cessna 172S, můžeme celkovou hmotnost považovat za téměř konstantní po dobu celého letu. Jelikož má na ní vliv pouze úbytek paliva vlivem jejího spalování,



úbytek oleje a dalších provozních kapalin. Směr působení lze považovat za svislý směrem do středu země. Fyzikálním vztahem ji poté popsat následující rovnicí:

$$F_g = m \times g$$

(12)

Kde F_g je tíhová síla, m je aktuální hmotnost a g je tíhové zrychlení Země.

3 Analýza současného stavu

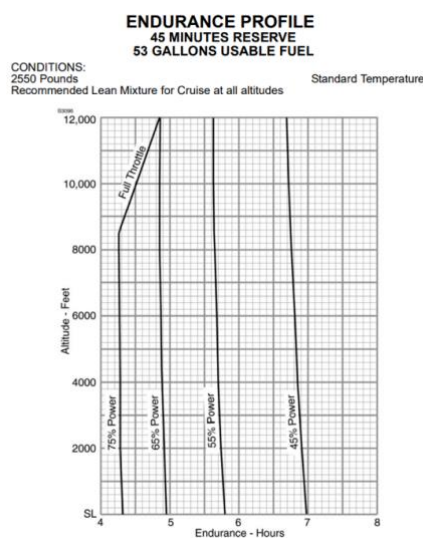
3.1 Letová příručka

V případě letounu Cessna 172S se příručka nazývá Pilot's Operating Handbook (POH), v překladu Provozní příručka pilota. Obsah příručky je shrnut do devíti kapitol: Obecné informace, Provozní omezení, Nouzové postupy, Normální postupy, Výkonnost, Hmotnost a vyvážení + Vybavení, Informace o systému, Handling + Servis + Údržba, Dodatky. Výše jsem uvedl různé negativní faktory na výkonnost letounu, tudíž zavedení příručky je nezbytné, abychom mohli určit, jak velký je jejich vliv na konkrétní typ letounu. [19]

3.1.1 Nástroje pro výpočet výkonnosti

Přístupů, jak lze v letových příručkách prezentovat data určující výkonnost, je mnoho. Zároveň s vývojem technologie byly i zavedeny elektronické systémy pro výpočet výkonnosti. Konkrétně u našeho letounu Cessna 172S se využívá grafů a tabulek pro zobrazení faktorů, které ovlivňují výkonnost. Jak jsem již uvedl výše, velmi častá je i potřeba interpolace mezi daty. Také je nutno dbát pokynů, které výrobce uvádí, jelikož i malá odchylka na začátku výpočtu může způsobit značně zavádějící výsledky [15].

První možností je grafické zobrazení dat, též odborně zvané jako monogram, které je grafickým provázáním několika funkcí. Nevýhodou této početní pomůcky je například chyba způsobená poškozením papíru nebo špatnou kvalitou vytištěného monogramu. Tudíž je tedy výstup z této metody závislý na zručnosti uživatele. Příklad uvádím na Obr. 7.



Obrázek 7: Monogram [19]



Další možností je tabulkové zobrazení, které je pro mnohé uživatele jednodušší a srozumitelnější metodou, jelikož jsou zde publikovaná data rozdělena do několika sloupců a řádků. V příručce letounu Cessna 172S se v modernějších verzích setkáme převážně s tímto zobrazením. Jako příklad uvádím Tab. 1, kde jsou uvedeny hodnoty pro výpočet potřebné vzdálenosti, času a paliva pro stoupání.

**TIME, FUEL AND DISTANCE TO CLIMB
AT 2550 POUNDS**

CONDITIONS:
Flaps UP
Full Throttle
Standard Temperature

Pressure Altitude Feet	Temp °C	Climb Speed KIAS	Rate of Climb FPM	From Sea Level		
				Time Minutes	Fuel Used Gallons	Distance NM
Sea Level	15	74	730	0	0.0	0
1000	13	73	695	1	0.4	2
2000	11	73	655	3	0.8	4
3000	9	73	620	4	1.2	6
4000	7	73	600	6	1.5	8
5000	5	73	550	8	1.9	10
6000	3	73	505	10	2.2	13
7000	1	73	455	12	2.6	16
8000	-1	72	410	14	3.0	19
9000	-3	72	360	17	3.4	22
10,000	-5	72	315	20	3.9	27
11,000	-7	72	265	24	4.4	32
12,000	-9	72	220	28	5.0	38

NOTE

- Add 1.4 gallons of fuel for engine start, taxi and takeoff allowance.
- Mixture leaned above 3000 feet pressure altitude for maximum RPM.
- Increase time, fuel and distance by 10% for each 10°C above standard temperature.
- Distances shown are based on zero wind.

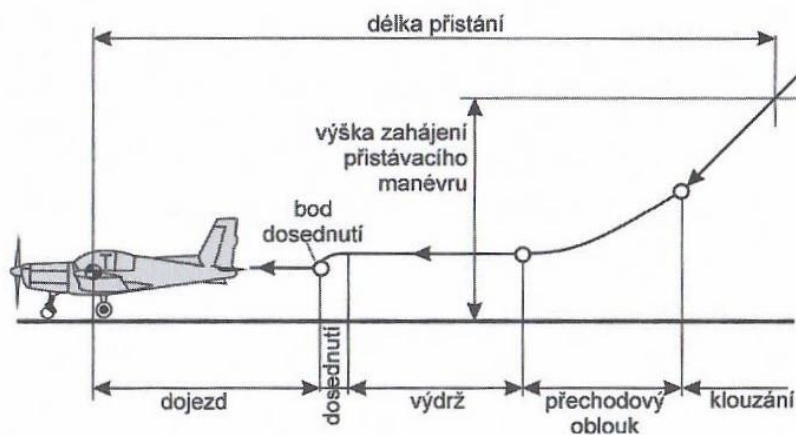
Tabulka 1: Hodnoty pro stoupání [19]

3.2 Fáze přistání

Délka přistání je měřena od přeletu tzv. definované výšky (screen height) do bodu dotyku a do úplného zastavení. Tato výška je 50 ft a je popsána jako minimální výška, kterou musí mít letoun nad prahem dráhy. Přistání obecně můžeme rozdělit na pět základních fází:

- 1) **Klouzání** – letadlo letí v ustáleném klesání s konstantní rychlostí, s vysunutým podvozkem a vztakovými klapkami [14].
- 2) **Přechodový oblouk** – letadlo přechází z klouzavého do vodorovného letu a výkon motoru je z pravidla na volnoběžných otáčkách [14].

- 3) **Výdrž** – přímočarý zpomalený pohyb letadla těsně nad zemí, při němž snižuje rychlost při klouzavém letu na rychlost dosednutí. Součástí této fáze je i tzv. podrovnání, které je definováno jako postupné zvyšování úhlu náběhu [14].
- 4) **Dosednutí** – v této fázi letadlo přechází z výdrže do dotyku se zemí a konec je v bodu dosednutí [14].
- 5) **Dojezd** – zpomalený pohyb letadla od dosednutí do jeho zastavení [14].



Obrázek 8: Grafické zobrazení fází přistání [14]

3.3 Faktory ovlivňující výkonnost při přistání

Délka přistání a celkově výkonnost letounu při přistání je závislá na mnoha faktorech, které se týkají vnějšího prostředí, tedy atmosféry a vlastností dráhy nebo samotného letounu a s tím spojené konfigurace.

U **větru** se posuzuje jeho směr a rychlost. Zadní vítr (TW) prodlužuje délku přistání, a naopak čelní vítr (HW) ji zkracuje. Boční složka větru na délku přistání nemá zásadní vliv, spíše pak na náročnost pilotáže [14] [15].

Hustota vzduchu negativně ovlivňuje výkon pohonné jednotky, jelikož její pokles (nižší obsah molekul kyslíku) zapříčiní horší spalování směsi ve spalovací komoře [15].

Teplota je velmi proměnlivý jev a souvisí s hustotou vzduchu. Tedy v případě nárůstu teploty poklesne hustota vzduchu, a to negativně ovlivní výkonnost pohonné jednotky, jak jsem uvedl výše [14] [15].



Dalším z faktorů je **povrch dráhy**. Pro výpočet potřebné délky přistání, jejíž hodnoty jsou uvedeny v příručce letounu, se bere v potaz pouze zpevněná dráha. Pro provoz na travnatých površích je nutné aplikovat koeficient, který pozmění výkonnostní charakteristiky. Nezpevněný povrch, z velké většiny travnatý, snižuje koeficient tření mezi povrchem a podvozkem letounu a tím negativně ovlivňuje brzdny účinek. V případě vysoké trávy se zvyšuje odpor, ale brzdny účinek nezpevněného povrchu stále převažuje [14] [15].

U **sklonu dráhy** obecně platí, že její kladný sklon (výška letiště se snižuje ve směru dojezdu) délku přistání prodlužuje a záporný sklon zkracuje. Sklon dráhy ovlivňuje zejména akceleraci letounu a pokud je tedy uvedeno v příručce, je nutné aplikovat potřebné koeficienty [14].

Kontaminací se rozumí jakékoli znečištění dráhy. Nejčastějšími znečištěními jsou poté sníh, voda nebo led. Tyto faktory znovu snižují tření a tím tak negativně ovlivňují brzdny účinek. Navíc v případě zaplavené dráhy existuje jev zvaný *aquaplaning*, kdy je účinek brzd téměř nulový [14] [15].

Hmotnost (tíha) působí proti složce vztlaku, a tedy při jejím navýšení je potřeba zvýšit i vztlak. Obecně u přistání platí, že rostoucí hmotnost letounu prodlužuje délku přistání. Nicméně tato hmotnost nesmí nikdy překročit svojí maximální hodnotu, kterou uvádí výrobce v příručce letounu [15].

Posledním faktorem je **konfigurace**. Tím se v případě menších letounů rozumí klapky a podvozek. Vysunutí klapek způsobí nárůst vztlaku a odporu. Také zapříčiní pokles pádové rychlosti, a tím je tedy pilot schopen letět na nižší rychlosti. Toho se využívá u přistání pro zpomalení na rychlost dosednutí. Podvozek u menších letounů může být dvojího způsobu – pevný a stavitelný. Pevný povozek zvyšuje odpor letounu v průběhu celého letu, naopak stavitelný podvozek jsme schopni zasunout a tím snížit odpor [14] [15].

3.4 Popis přistání za použití metody „*short field*“

Tato metoda je přesně popsána v příručce letounu Cessna 172S a obecně slouží pro možnost přistání za využití co nejkratší vzdálenosti. Všechny hodnoty jsou měřeny bez povětrnostních podmínek. Pro práci s větrem zde výrobce uvádí dodatečné informace po tabulkou hodnot. Výrobce dále specifikuje, že konečná fáze přiblížení je letěna rychlostí 61 kt, s vysunutými klapkami do polohy FULL a za použití dostatečných otáček pro udržení se na sestupové čáře. Za turbulentních podmínek by pilot ale měli letět na vyšší rychlosti. Po přeletění všech překážek by se otáčky měli snížit. Prvotní kontakt s dráhou by měl být hlavním podvozkem a



poté předním za otáček na volnoběh. Ihned po dosednutí bychom měli začít brzdit a pro maximální výkonnost brzd zasuneme do polohy UP a přitáhneme berany [19].

Nicméně, této metody se za normálního provozu nevyužívá, jelikož je náročnější z hlediska pilotáže a pro piloty ve výcviku by mohla být až nebezpečná. Zároveň také dochází k většímu opotřebením brzd, protože aplikujeme jejich maximální výkonnost po dosednutí.

3.5 Popis přistání bez použití metody „*short field*“

Přistání za normální podmínky se podstatně liší od metody „*short field*“ a výrobce jej taktéž detailně popisuje v příručce letounu. Zde uvádí, že přistání může být letěno s jakýmkoli nastavením klapek. Rychlost taktéž není blíže specifikována, pilot se pouze musí držet ve stanovených limitech, které jsou pro každou polohu klapek odlišné. Dále pak upozorňuje na možnost výskytu kmitání výškového kormidla při vyšším úhlu skluzu a s vysunutými klapkami do polohy 20° nebo více. Také uvádí, že pro přistání za nižší rychlosti bude potřeba kratší vzdálenost a dojde k menšímu opotřebením pneumatik a brzd. Prvotní kontakt s dráhou musí být hlavním podvozkem, poté předovým [19].

Výše uvedený postup je tak ukázkou běžného přistání. Je také z hlediska namáhání letounu šetrnější variantou, a proto je i obvykle upřednostňován za normálních podmínek, kdy délka dráhy není kritickým faktorem a může si to pilot dovolit.



4 Realizace experimentu

Tato kapitola popisuje samotné měření délky přistání na výcvikových letounech Cessna 172S, které mi poskytlo výcvikové středisko, které sídlí v Hradci Králové.

4.1 Prostředky využité pro experiment

V této kapitole bude popsán letoun, na kterém byl experiment měřen. Uvedu zde jeho základní konstrukční a výkonnostní parametry. Dále pak popis zařízení Garmin G1000 a Garmin GLO2.

4.1.1 Popis letounu Cessna 172S

Modelů tohoto letounu již v dnešní době existuje více, nicméně pádným důvodem výběru právě tohoto, je fakt, že letoun je vybaven zařízením pro zapisování letových údajů, bez kterého bych se v průběhu experimentu neobešel.

Vyráběn je již od roku 1956 společností Cessna Aircraft Company. S postupem času byl také několikrát modernizován a upravován do mnoha modelů. Některé tak i disponují zatahovatelným podvozkem či stavitelnou vrtulí. Svými parametry se poté stal nejrozšířenějším letounem na celém světě. Zejména si jej pak oblíbila výcviková střediska pro nové piloty ve výcviku z důvodu jednodušší pilotáže a možnosti využití pro lety VFR i IFR [12].

Model S, celým názvem Skyhawk, byl poté uveden na trh roku 1998. Z konstrukčního hlediska se jedná o jednomotorový hornoplošník, který je vybaven pevnou vrtulí a pevným předovým podvozkem. Pístový motor od výrobce Lycoming dosahuje maximálního výkonu 134 kW při 2700 RPM a pohání vrtuli o průměru 193 cm. Klapky letounu disponují čtyřmi základními polohami, kterými jsou: UP, 10°, 20° a FULL. Poloha FULL zajistí vysunutí klapky na 40° a je využívána pro přistání na metodu „*short field*“. Pro normální přistání se především využívají zbylé tři polohy, dle uvážení pilota [12].

Basic Empty Weight (BEW) není přesně stanovena a může se tak lišit u každého vyrobeného kusu. Skládá se ze Standard Empty Weight (1664 lb) a hmotnosti provozního vybavení letounu. Tím může například být zařízení Garmin G1000, které popisují v dalších kapitolách [12].

Maximum Take-off Weight (MTOW) je stanovena výrobcem na hodnotu 2550 lb. Jedná se o maximální povolenou hmotnost letounu pro vzlet [12]. Existuje poté ještě Maximum Taxi

Weight (MTW), která je oproti MTOW navýšena o množství paliva, které bude využito po dobu poježdění po zemi.

Nádrže pro palivo jsou umístěny na obou stranách křídel a jejich maximální kapacita je 28 U.S. Gal. Celkem to tedy činí 56 U.S. Gal, z čehož přesně 3 U.S. Gal jsou nevyužitelné. Pokud bychom hmotnost paliva chtěli převést na hmotnost, tak můžeme vycházet z přibližné hodnoty 1 U.S. Gal, který je roven 6,2 lb. Maximální hmotnost paliva na palubě je tedy 328,6 lb [12].

4.1.2 Garmin G1000

Jedná se o Elektronický letový informační systém – EFIS od společnosti Garmin, kterým jsou vybaveny letouny Cessna 172S, které jsem využíval pro sběr dat. Tento systém slouží jako modernější náhrada budíků v kabině a sjednocuje je tak do dvou obrazovek. O letounech, které jsou vybaveny EFIS, se též říká, že mají tzv. *skleněný kokpit* (glass cockpit). Nicméně pro účely letů IFR jsou letouny nadále vybaveny záložními budíky, konkrétněji se zde nachází umělý horizont, indikátor vzdušné rychlosti a barometrický výškoměr. Jak už jsem avizoval, tak systém EFIS rozděluje pozornost avionika na dvě základní obrazovky – Primary Flight Display (PFD) a Multi-function Display (MFD). PFD sjednocuje nejzásadnější informace pro pilota, tedy: umělý horizont, rychlost, výšku, kurz letu a rychlost klesání/stoupání. Sjednocením informací z těchto zařízení do jedné obrazovky tak zjednodušuje pilotovo situační povědomí. MFD, jak už z názvu vychází, je obrazovka, která se využívá k zobrazení hned několika dodatečných informací. Těmi jsou například: informace o navigaci a počasí, teploty a tlaku oleje, sání, množství paliva a dalších. Obnovovací frekvence všech údajů je 1x za sekundu.

Tento komplexní systém je zároveň natolik inteligentní, že si všechna svá data ukládá na paměťovou kartu. Právě této možnosti jsem využil ke sběru dat pro přesné stanovení délky přistání, které se budu věnovat v dalších kapitolách této práce [13].



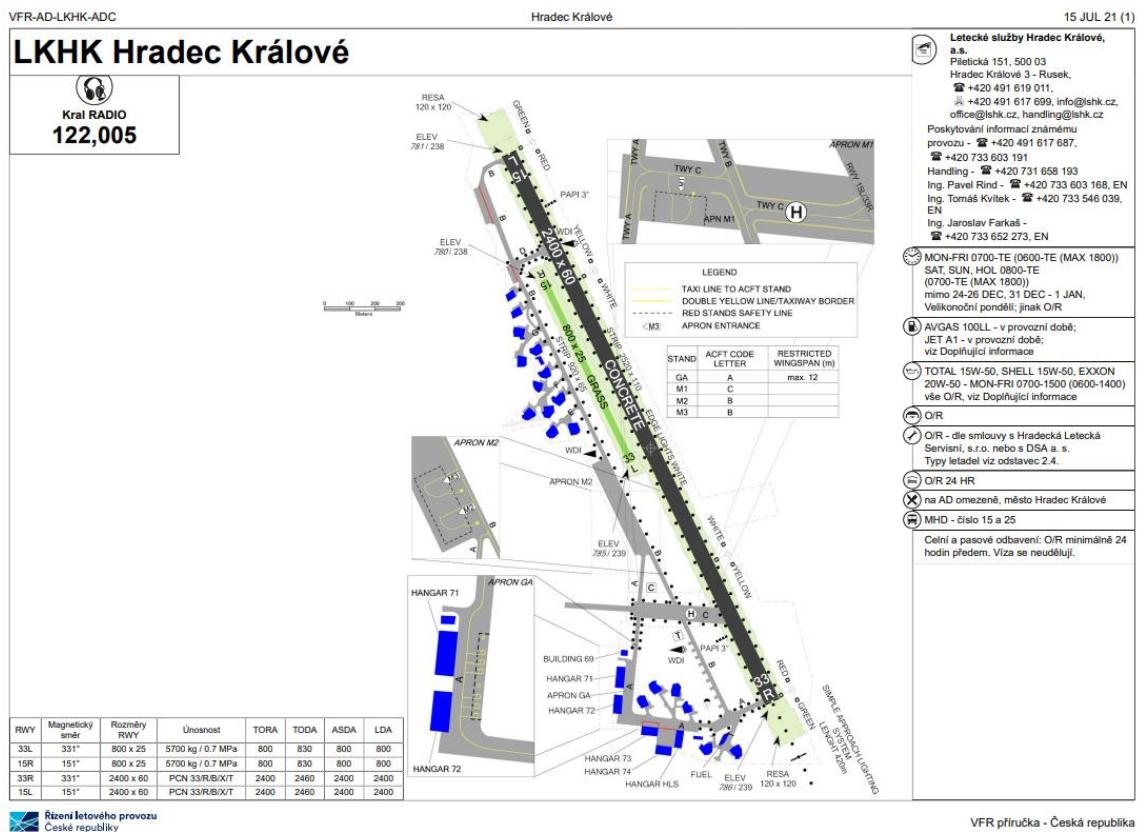
Obrázek 9: Garmin G1000 (PFD, MFD) [13]

4.1.3 Garmin GLO2

Jedná se rovněž o zařízení od výrobce Garmin, které slouží pro příjem signálu z družic GPS/GLONASS. Jeho výhodou je oproti ostatním přijímačům či mobilním telefonům vyšší přesnost a obnovovací frekvence 10x za sekundu. Toto zařízení jsem využil pro naměření délky přistání do úplného zastavení. Konkrétnější důvody a postup implementace je popsán v dalších kapitolách této práce [13].

4.2 Popis využívaných letišť

Většina měření se uskutečnila na letišti v Hradci Králové, které se nachází na severu od města. Na letišti se nachází dvě paralelní dráhy. Podstatná část výzkumu délky přistání byla měřená na betonové dráze o délce 2400 m a šířce 60 m. Druhou méně využívanou alternativou je pak dráha travnatá o délce 800 m a šířce 25 m. Několik málo letů bylo také naměřeno na letišti Brno Tuřany a Ostrava Mošnov.



Obrázek 10: Mapa letiště LKHK [23]

4.3 Identifikace dráhy

Pro identifikaci dráhy pro přistání jsem využil data o kurzu letounu. Dále jsem také stanovil na základě GPS souřadnic jednotlivé dráhy a k nim přiřadil nadmořskou výšku prahu dráhy včetně podélného sklonu a povrchu.

4.4 Postup pro zjištění naměřených délek přistání

4.4.1 Sběr dat

Pro sběr dat jsem využil zařízení Garmin G1000, které se nachází na celkem pěti výcvikových letounech. Kompletní seznam všech údajů, které je tento systém schopen zachytit uvádím na Obr. 10.

- | | | |
|--|--|--|
| • Date | • Longitude (degrees; geodetic; +East) | • GPS fix |
| • Time | • Magnetic Heading (degrees) | • GPS horizontal alert limit |
| • GPS altitude (MSL) | • HSI source | • GPS vertical alert limit |
| • GPS altitude (WGS84 datum) | • Selected course | • SBAS GPS horizontal protection level |
| • Baro-Corrected altitude (feet) | • Com1/Com2 frequency | • SBAS GPS vertical protection level |
| • Baro Correction (in/Hg) | • Nav1/Nav2 frequency | • Fuel Qty (right & left)(gals) |
| • Indicated airspeed (kts) | • CDI deflection | • Fuel Flow (gph) |
| • Vertical speed (fpm) | • VDI/GP/GS deflection | • Fuel Pressure (psi) |
| • GPS vertical speed (fpm) | • Wind Direction (degrees) | • Voltage 1 and/or 2 |
| • OAT (degrees C) | • Wind Speed (knots) | • Amps 1 and/or 2 |
| • True airspeed (knots) | • Active Waypoint Identifier | • Engine RPM |
| • Pitch Attitude Angle (degrees) | • Distance to next waypoint (nm) | • Oil Pressure (psi) |
| • Roll Attitude Angle (degrees) | • Bearing to next waypoint (degrees) | • Oil Temperature (deg. F) |
| • Lateral and Vertical G Force (g) | • Magnetic variation (degrees) | • TIT (deg. F) |
| • Ground Speed (kts) | • Autopilot On/Off | • Manifold Pressure (in. Hg) |
| • Ground Track (degrees magnetic) | • AFCS roll/pitch modes | • CHT |
| • Latitude (degrees; geodetic; +North) | • AFCS roll/pitch commands | • EGT |

Obrázek 11: Souhrn všech dat z G1000 [13]

4.4.2 Vstupní parametry

Hmotnost letounu byla považována za konstantní na hodnotě 2550lb. Důvody tohoto rozhodnutí uvádím v závěrečné kapitole této práce.



4.4.3 Selekcce dat

Z celkového souhrnu dat jsem vybral pouze údaje, které byly relevantní pro přistání. Prvním z nich pak byl vybrán údaj o datumu letu a času, kdy se uskutečnil. Následně byly použity data o rychlosti vůči zemi (GS) v jednotkách uzlů, vertikální rychlost v jednotkách ft/min, výška v jednotkách stop zachycená pomocí GNSS senzorů a také výška naměřená barometrickým výškoměrem. Z motorových přístrojů byl využit pouze údaj o otáčkách motoru.

Z meteorologických dat, které jsou možné získat ze zařízení, byly využity informace o teplotě ve stupních °C. Dále pak informace o tlaku QNH, který byl v jednotkách inHg,. Tento tlak byl změřen z výškoměrů a později sloužil pro výpočet tlakové výšky. Dalším údajem byla rychlost a směr větru. Zde byla z údajů dopočítána relativní hodnota vůči podélné ose letounu, kde pro rozpoznání, zda se jedná zadní či čelní vítr, je uvedeno znaménko „-“ u hodnot čelního větru.

Dodatečnými informacemi, které mohly být užitečné poté byly údaje z palivoměrů o množství paliva v nádržích v jednotkách U.S. Gal a jeho průměrná spotřeba.

Pro získání naměřených délek přistání byl poté vytvořen skript v programu Matlab, který pracoval s každým souborem ve formátu CSV jako jednotlivým letem, zároveň také procházel jednotlivé řádky (označené písmenem „i“) souborů a postupně je zpracovával. Každému z nich pak přiřadil informaci o datumu, čase a názvu souboru, ze kterého vycházel. Pro přesné stanovení délek bylo nutné identifikovat jednotlivé fáze přistání: průlet definovanou výškou (začátek), bod dotyku, konec dojezdu.

a) Základní parametry

- 1) Ground speed < 10 kt – **konec dojezdu** bude identifikován v prvním řádku po přeletění definované výšky, ve kterém platí, že je GS < 10 kt.
Poté se skript vrátí o 180 řádků před řádek, který byl označen jako konec dojezdu.
- 2) Flight AltitudeGPS < Landing Roll End AltitudeGPS + 50 ft – za **definovanou výšku** je poté považován první následující řádek, pro který platí podmínka, že součet hodnoty výšky naměřené z GNSS senzorů a 50 ft, je větší než výška naměřená z GNSS senzorů v letu.
- 3) $(\text{Flight Altitude GPS (i)} - \text{Flight AltitudeGPS (i+5)}) < 1 \Leftrightarrow \text{Flight Vertical Speed} > -50$ – za **bod dotyku** je považován první následující řádek, pro který platí, že rozdíl hodnot výšky naměřené z GNSS senzorů na první a pátém řádku je menší než 1, a současně platí, že vertikální rychlost v jednotkách ft/min je větší než -50.

b) Dodatečné parametry



- 1) $HDG \pm 15^\circ$ – pokud dojde ke změně HDG o více než 15° od pátého řádku za místem, které je identifikováno za bod dotyku, přistání je označeno ve sloupci LandingValid hodnotou -1.
- 2) $RPM > 925$ – pokud dojde k nárůstu na hodnotách otáčkoměru nad hodnotu 925 u pátého řádku před identifikovaným koncem dojezdu, přistání je označeno ve sloupci LandingValid hodnotou -1.

Pokud přistání splní oba tyto dodatečné parametry je označeno v řádku LandingValid hodnotou 0, jinak 1.

Výstupem skriptu byl poté soubor ve formátu CSV, ve kterých byly zaznamenán údaj o datumu a čase, vzdálenosti dojezdu v metrech, vzdálenosti celého přistání v metrech, rychlost v bodě dotyku v uzlech, rychlost v bodě, který byl považován za konec přistání v uzlech, barometrická výška v bodě dotyku ve stopách, množství paliva v U.S.Gal, směr a rychlost větru, teplota, nastavení QNH na výškoměru a hmotnost letounu.

4.4.4 Výpočet decelerace a délky pro úplné zastavení

Jelikož v žádném ze zjištěných výsledků rychlost letounu na konci dojezdu neklesla na hodnotu 0, bylo potřeba změřit vzdálenost pro dodatečnou deceleraci. To jsem provedl následujícím způsobem:

- 1) Pomocí zařízení Garmin GLO2, jsem naměřil délku přistání do úplného zastavení.
- 2) Z naměřených hodnot jsem vyseletoval pouze časový údaj pro zpomalení.
- 3) Na základě níže uvedené rovnice jsem dopočítal deceleraci.

$$a = \frac{v_1 - v_0}{t}$$

(13)

Kde a je decelerace, v_1 je konečná rychlost (tedy 0), v_0 je počáteční rychlost a t je časový údaj ve vteřinách.

- 4) Na základě níže uvedené rovnice jsem dopočítal vzdálenost potřebnou pro deceleraci na rychlost 0 m/s.

$$a = \frac{v_1^2 - v_0^2}{2 \times S}$$

(14)



Kde a je decelerace, v_1^2 je kvadrát konečné rychlosti (tedy 0), v_0^2 je kvadrát počáteční rychlosti a S je vzdálenost.

Po úpravě:

$$S = \frac{v_1^2 - v_0^2}{2 \times a}$$

(15)

Kde S je vzdálenost, v_1^2 je kvadrát konečné rychlosti (tedy 0), v_0^2 je kvadrát počáteční rychlosti a a je decelerace.

- 5) Vypočtenou hodnotu vzdálenosti pro deceleraci na 0 m/s jsem na základě počáteční (vstupní) rychlosti ekvivalentně přičetl k délce dojezdu a celkové délce přistání.

4.5 Postup pro zjištění vypočtených délek přistání

4.5.1 Postup výpočtu

Pro výpočet jsem využil jediné tabulky pro délku přistání pomocí metody „*short field*“, kterou uvádím níže. Metoda, pomocí které jsou tyto hodnoty naměřeny, je detailně popsána v předchozích kapitolách této práce.



SHORT FIELD LANDING DISTANCE AT 2550 POUNDS

CONDITIONS:

Flaps FULL
Power IDLE
Maximum Braking

Zero Wind
Paved, Level, Dry Runway
Speed at 50 ft: 61 KIAS

Pressure Altitude Feet	0°C		10°C		20°C		30°C		40°C	
	Gnd Roll Feet	Total Feet To Clear 50 Foot Obst	Gnd Roll Feet	Total Feet To Clear 50 Foot Obst	Gnd Roll Feet	Total Feet To Clear 50 Foot Obst	Gnd Roll Feet	Total Feet To Clear 50 Foot Obst	Gnd Roll Feet	Total Feet To Clear 50 Foot Obst
Sea Level	545	1290	565	1320	585	1350	605	1380	625	1415
1000	565	1320	585	1350	605	1385	625	1420	650	1450
2000	585	1355	610	1385	630	1420	650	1455	670	1490
3000	610	1385	630	1425	655	1460	675	1495	695	1530
4000	630	1425	650	1460	675	1495	700	1535	725	1570
5000	655	1460	680	1500	705	1535	725	1575	750	1615
6000	680	1500	705	1540	730	1580	755	1620	780	1660
7000	705	1545	730	1585	760	1625	785	1665	810	1705
8000	735	1585	760	1630	790	1670	815	1715	840	1755

NOTE

- Short field technique as specified in Section 4.
- Decrease distances 10% for each 9 knots head wind. For operation with tail winds up to 10 knots, increase distances by 10% for each 2 knots.
- For operation on dry grass runway, increase distances by 45% of the "ground roll" figure.
- If landing with flaps up, increase the approach speed by 9 KIAS and allow for 35% longer distances.

Tabulka 2: Tabulka přistávací výkonnosti letounu Cessna 172S [19]

Zpracování dat jsem prováděl v programu Microsoft Excel, kam jsem si převedl údaje ve formátu CSV ze skriptu vytvořeného v programu Matlab. Postup pro získání vypočtených délek byl následující:

- 1) Výpočet tlakové výšky na základě níže uvedené rovnice:

$$Pressure\ altitude\ (PA) = (29,92 - Altimeter\ setting) \times 1000 + Elevation$$

(16)

Kde PA je tlaková výška, číslo 29,92 je hodnota tlaku na úrovni střední hladiny moře v jednotkách palců rtuti, $Altimeter\ setting$ je nastavení na tlakoměru v jednotkách palců rtuti a $Elevation$ je hodnota výšky nad střední hladinou moře.

- 2) Zavedení funkce FORECAST, která předpoví budoucí hodnotu lineárního trendu na základě vstupních hodnot z uvedené tabulky. Tuto funkci jsem zavedl celkem dvakrát, pro interpolaci hodnot o tlakové výšce a teplotě.



- 3) Z hodnot o směru a rychlosti větru ze zařízení Garmin G1000, které je součástí vybavení letounu Cessna 172S, jsem upravil vypočtené hodnoty na základě níže uvedených podmínek, které výrobce publikoval pod tabulkou.
- a) Zkrátil jsem délku přistání o 10 % za každých 9kt čelního větru
 - b) Prodloužil jsem délku přistání o 10 % za každé 2kt zadního větru.



4.6 Seznam vyřazených letů

Po bližším prozkoumání všech naměřených délek přistání došlo k vyřazení několika letů. Jejich seznam spolu s důvody, které vedly k mému rozhodnutí uvádím níže.

1)

Ground roll (ft)	Deceleration distance (ft)	Final ground roll (ft)	Landing distance (ft)	Calculated ground roll (ft)	Calculated landing distance (ft)
14,66	45,57	60,24	2527,65	586,46	1333,98

Tabulka 3: Vyřazený let č. 1

Z tabulky je patrné, že došlo ke špatnému naměření délky dojezdu (Final ground roll), jelikož vzdálenost po připočtení délky pro deceleraci je pouze 60,24 ft. Příčinou této chyby je pravděpodobně chybně identifikovaná rychlost v bodě dotyku.

2)

Ground roll (ft)	Deceleration distance (ft)	Final ground roll (ft)	Landing distance (ft)	Calculated ground roll (ft)	Calculated landing distance (ft)
97,06	41,07	138,13	2802,5	598,78	1372,75

Tabulka 4: Vyřazený let č. 2

Zde je opět patrné, že došlo ke špatnému naměření délky dojezdu (Final ground roll), které bylo opět pravděpodobně zapříčiněné špatnou identifikací rychlosti v bodě dotyku.



3)

Ground roll (ft)	Deceleration distance (ft)	Final ground roll (ft)	Landing distance (ft)	Calculated ground roll (ft)	Calculated landing distance (ft)
3348,39	48,67	3397,06	4286,78	643,26	1482,77

Tabulka 5: Vyřazený let č. 3

Zde naopak došlo k přesnému naměření délky přistání, ale výsledky byly ovlivněny samotnou pilotáží, jelikož je z výsledků patrné, že došlo k záměrnému prodloužení délky dojezdové vzdálenosti.

4)

Ground roll (ft)	Deceleration distance (ft)	Final ground roll (ft)	Landing distance (ft)	Calculated ground roll (ft)	Calculated landing distance (ft)
5204,3	47,97	5252,27	6272,66	783,99	1808,02

Tabulka 6: Vyřazený let č. 4

Zde znovu došlo ke správnému naměření délky přistání, ale výsledky ovlivnila pilotáž a došlo tedy k záměrnému prodloužení délky pro dojezd.



5)

Ground roll (ft)	Deceleration distance (ft)	Final ground roll (ft)	Landing distance (ft)	Calculated ground roll (ft)	Calculated landing distance (ft)
4108,18	48,97	4157,15	6568,7	611,45	1421,51

Tabulka 7: Vyřazený let č. 5

Zde znovu došlo ke správnému naměření délky přistání, ale výsledky byly ovlivněny pilotáží. Jednalo se o přistání na dráhu 15L, kde velmi často dochází k záměrnému prodloužení délky přistání kvůli zkrácení pojížděcí doby k hangárům.

6)

Ground roll (ft)	Deceleration distance (ft)	Final ground roll (ft)	Landing distance (ft)	Calculated ground roll (ft)	Calculated landing distance (ft)
0	39,53	39,53	2796,46	657,93	1496,45

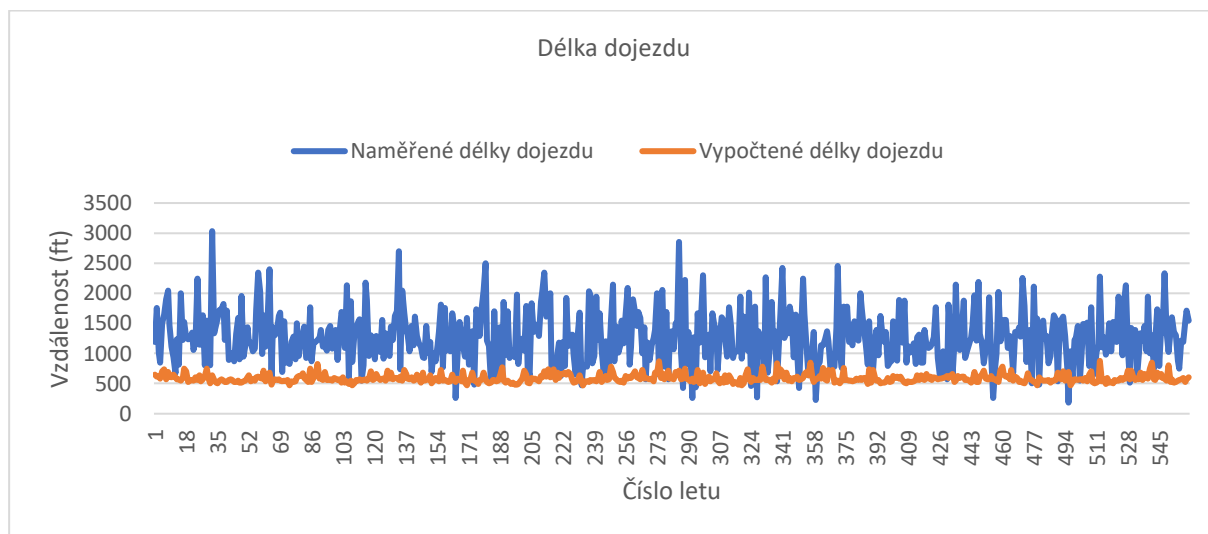
Tabulka 8: Vyřazený let č. 6

V tomto případě došlo k chybnému naměření délky dojezu (Final ground roll). Jelikož nemám přesné údaje o její vzdálenosti, nemohu let zařadit do výsledků své práce.

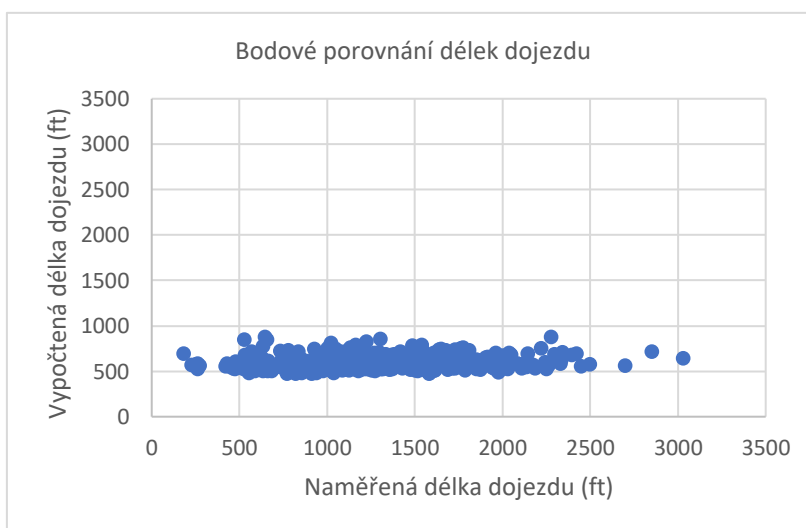
5 Výsledky vyhodnocení všech letů

5.1 Porovnání hodnot dojezdu

Ve svém měření jsem se dopracoval k poměru mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami, který činí pro délku dojezdu přibližně 2,15. Zároveň pouze u 28 naměřených délek dojezdu bylo změřena kratší potřebná vzdálenost než u vypočtených délek. Procentuálně to činí přesně 5 % všech délek dojezdu. Průměrná naměřená délka dojezdu u těchto letů byla stanovena na 1270,91 ft (387,38 m) a průměrná hodnota rozdílu mezi naměřenými a vypočtenými délkami dojezdu na 682,4 ft (208 m). Jejich grafické porovnání je zobrazeno na Obr.12.

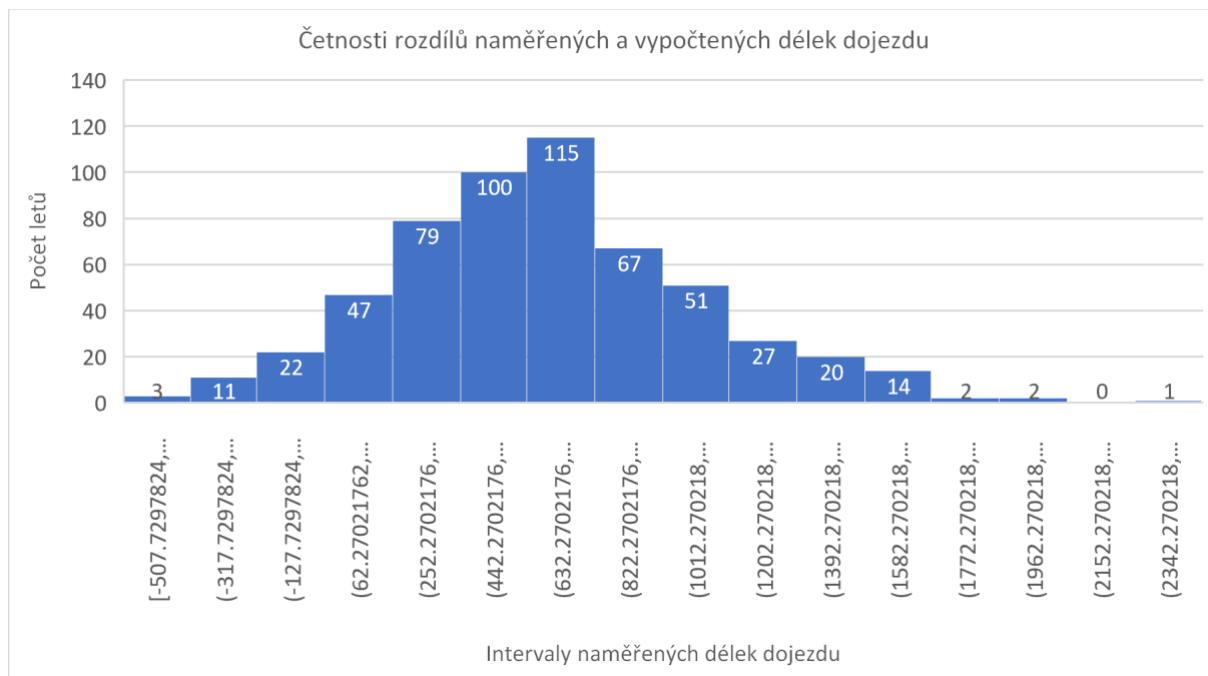


Obrázek 12: Graf porovnání délek dojezdu

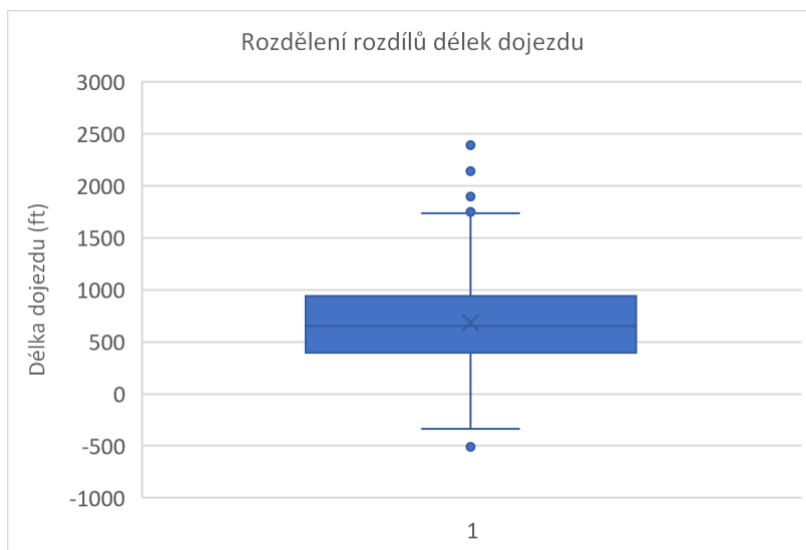


Obrázek 13: Bodový graf porovnání délek dojezdu

Z grafu četností naměřených a vypočtených délek dojezdu na Obr. 14 také vychází, že nejčastěji byly rozdíly na intervalu v rozmezí od 442 ft do 632 ft a to pro 115 letů, dalších 100 letů se lišilo o rozdíl v intervalu mezi 252 ft do 442 ft. Celkem to činí 38,3 % všech letů.



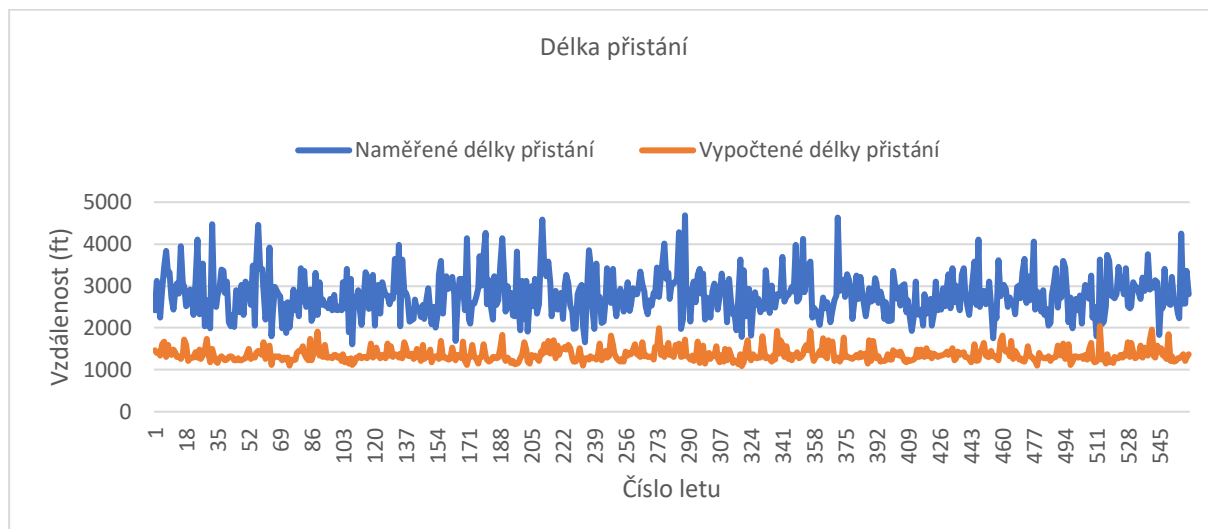
Obrázek 14: Graf četnosti rozdílů délek dojezdu



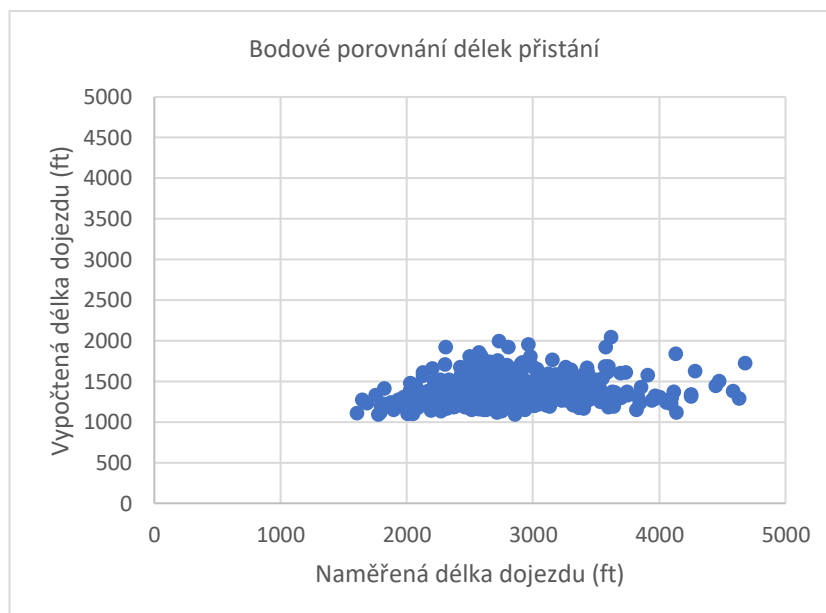
Obrázek 15: Rozdíly délek dojezdu v krabicovém diagramu

5.2 Porovnání hodnot celkového přistání

V měření jsem se dopracoval k poměru mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami, který činí pro délku celkového přistání přibližně 2,04. U žádného ze všech 561 letů nebyla naměřená délka celkového přistání kratší než vypočtená hodnota. Průměrná naměřená délka přistání činí 2785,24 ft (848,95 m) a průměrná hodnota rozdílu mezi naměřenými a vypočtenými délkami celkového přistání 1425,03 ft (434,35 m). Jejich grafické porovnání je zobrazeno na Obr. 16.

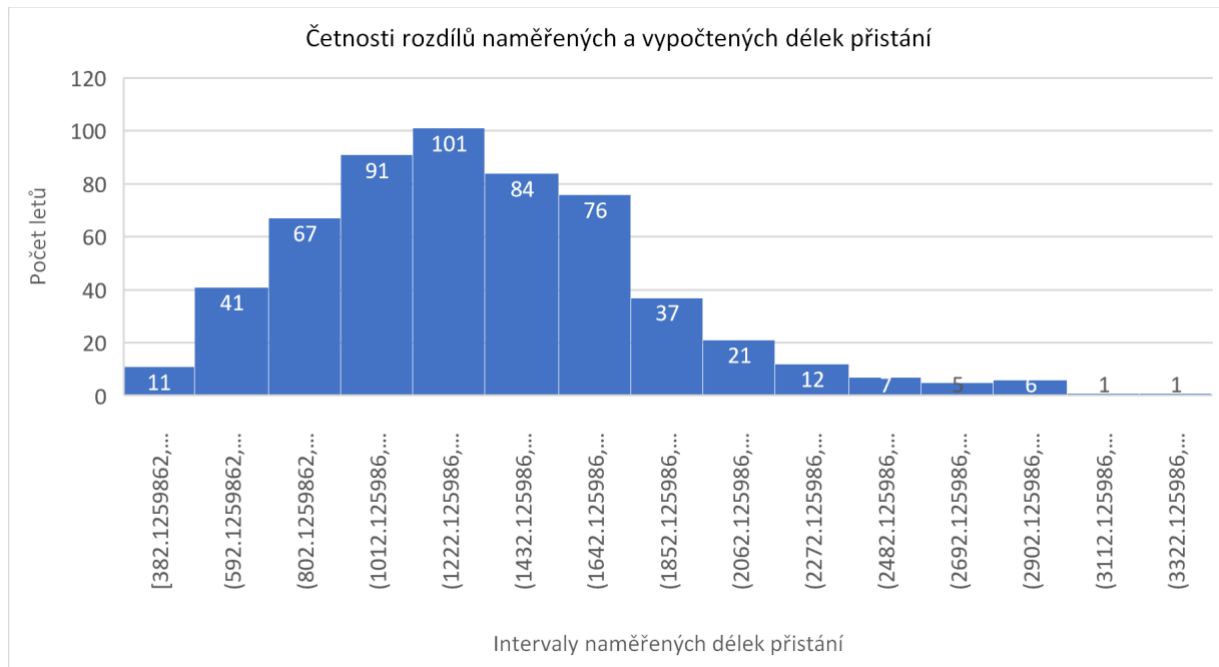


Obrázek 16: Graf porovnání délek celkového přistání

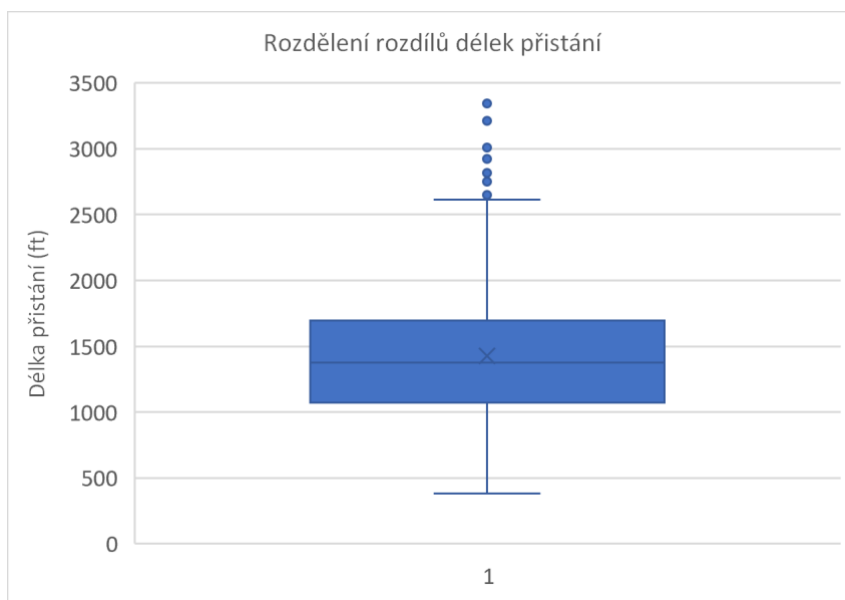


Obrázek 17: Bodový graf porovnání délek přistání

Z grafu četností naměřených a vypočtených délek přistání vychází, že nejčastěji byly rozdíly na intervalu v rozmezí od 1012 ft do 1222 ft a to pro 101 letů, dalších 91 letů se lišilo o rozdíl v intervalu mezi 802 ft do 1012 ft. Celkem to činí 34,2 % všech letů.



Obrázek 18: Graf četnosti rozdílů délek přistání



Obrázek 19: Rozdíly délek přistání v krabicovém diagramu



Celkový souhrn všech zjištěných výsledků je uveden v Tab. 9

Průměrná délka vypočtené délky dojezdu (ft)	588,51
Průměrná délka vypočtené délky přistání (ft)	1360,21
Průměrná délka naměřené délky dojezdu (ft)	1270,91
Průměrná délka naměřené délky přistání (ft)	2785,24
Koeficient délky dojezdu (naměřená/vypočtená)	2,15
Koeficient délky přistání (naměřená/vypočtená)	2,04
Průměrný rozdíl vypočtené a naměřené délky dojezdu (ft)	682,4
Průměrný rozdíl vypočtené a naměřené délky přistání (ft)	1425,03

Tabulka 9: Souhrn všech výsledků



6 Diskuse

Po selekci dat a na základě výše uvedeného postupu se mi podařilo nasbírat data z celkem 561 letů v časovém rozmezí od 24.8.2016 do 27.7.2022, kde se u většiny případů jednalo o přistání na letišti v Hradci Králové.

Původním záměrem této práce mělo být zpracování většího množství dat, nicméně většinu z nich nebylo možné zařadit do měření, protože neprošla stanovenými parametry, pracoval jsem pouze s již zmiňovaným obnosem dat. Původním záměrem také bylo zařadit více letů na odlišných letištích, ale jelikož se letoun Cessna 172S využívá především na IFR lety z Hradce Králové do Hradce Králové, přistání na jiných letištích nebývá tak časté. Na jiných letištích se pouze provádí nácvik přiblížení do minim a poté se provede postup nezdařeného přiblížení.

V průběhu zpracovávání dat jsem se také setkal s problémem o celkové hmotnosti letounu. Původně byl k mé práci přidružený dotazník pro piloty, pomocí kterého by se na základě jejího vyplnění zjistila přibližná celková hmotnost letounu včetně posádky a zavazadel. Nicméně od tohoto jsem upustil, protože jsem nebyl schopen shromáždit dostatek formulářů a nemohl také využívat záznamy o přistání staršího data. V práci jsem tedy pokračoval s verzí, kde jsem určil na základě pozorování, konstantní hmotnost pasažérů a zavazadel. Tato hmotnost činila 412 lb. Od této verze jsem později také upustil, vedl mě k tomu fakt, že pro mě neexistoval způsob, jak přesně určit vliv hmotnosti letounu na délky vypočtených přistání. V příručce letounu Cessna 172S totiž výrobce uvádí stanovené délky pouze pro maximální hmotnost, tedy 2550 lb. Potřeboval jsem ještě alespoň jednu tabulku pro jinou hmotnost. Po kontaktu výrobce mi ale bylo sděleno, že bohužel žádná taková tabulka nikdy nevznikla a nemohli mi nijak pomoci.

Na základě vyhodnocení dat byl potvrzen předpoklad, že délky naměřené za normálního provozu budou delší než hodnoty vypočtené z tabulky v příručce letounu. Z vyhodnocení vyplývá, že větší jsou rozdíly u délky dojezdu než u celkové délky přistání. Celkově z výsledků měření vyplývá, že piloti by za dodržení normální metody pro přistání mohli očekávat dvojnásobné vzdálenosti oproti metodě *short field*.



7 Závěr

Ze své pozice kadeta ve výcviku mohu na základě vlastních poznatků přiznat, že předletové přípravě se mnohdy neklade dostatečná důslednost. Zejména části týkající výkonnosti letadla, výpočtům hmotnosti a vyvážení. To je z části pravděpodobně způsobeno rozsáhlostí příručky letounu a složitostí těchto výpočtů pro nezkušené. Proto i z vlastní zkušenosti mohu říci, že častěji svoji mentální kapacitu ubírám na činnosti, které jsou z mého pohledu vnímány jako ty důležitější. Abych pouze nás studenty neosočoval, je to z velké části zapříčiněno naším rozptýlením a ubíráním pozornosti na stav počasí, přípravu navigačních štítků, zakreslení trati letu do map, vyřizování telefonátů pro povolení, koordinaci IFR letů s řídicími letového provozu či vyplňování letového plánu. Předletová příprava je tedy značně časově náročná, i pokud nedojde k jakýmkoli neočekávaným faktorům. Dalším důvodem opomínání výkonnosti může být názor, „že to vždy vyjde“, jelikož použitelné délky drah jsou mnohdy velmi dlouhé pro malé sportovní a výcvikové letouny. Pro tyto případy však má výcviková škola vypracované své SOP, aby nebylo nic opomenuto a příprava na let byla co možná nejefektivnější z hlediska času.

Mým cílem práce tedy bylo stanovit koeficient, který by tak mohl zefektivnit přípravu pro výpočty výkonnosti. Jednoduše by pak pilot tímto koeficientem vynásobil hodnoty uváděné v příručce, vzhledem k adekvátní tlakové výšce a teplotě počasí, a tím se tak dostal na bezpečnou stranu.

V průběhu mé práce jsem se setkal s několika limitacemi, které by potenciálně mohly vést k nepřesnostem. První z nich bylo zavedení konstantní hodnoty hmotnosti letounů. Toto byl bohužel nutný krok, kterému jsem se nemohl vyhnout, jelikož i po kontaktu výrobce jsem nedostal žádnou tabulku pro úpravu hodnot v závislosti na hmotnosti, než jak je tomu například u tabulek pro délku vzletu, kde výrobce uvádí tři různé tabulky pro 2550 lb, 2400 lb a 2200 lb. Tím pádem jsem nebyl schopen tyto data jakkoli interpolovat.

Dále je také nutno brát v potaz, že se vždy jednalo o výcvikové lety. Proto je velmi pravděpodobné, že nezkušenost pilotů mohla vést k prodloužení potřebné délky pro přistání. Což mohu i z vlastní zkušenosti potvrdit, jelikož u letů IFR, ke kterým se letadlo Cessna 172S především využívá, se již neprocvičuje zručnost pilota přistávat. A vzhledem k tomu, že oproti letům VFR, kdy se v průběhu letu přistává na letištích mnohem častěji, může dojít ke zhoršení této dovednosti.



Dalším faktorem je bezpochyby množství získaných dat, kdy za ideálního stavu bych pro přesnější stanovení výsledků potřeboval množství letů z řad několika jednotek tisíců. Bohužel ne všechny paměťové karty z letadel byly uchovávány, tudíž nebylo možné je již jakkoli získat.

Posledním faktorem by pak mohla být samotná chyba měření letových parametrů u zařízení Garmin G1000, které se nachází na palubě letadel. Například nepřesnost naměřených dat o rychlosti a směru větru by mohly ovlivnit výsledky i o několik desítek stop. Opět za ideálního stavu by museli piloti po přistání vyplnit formulář, ve kterém by uvedly přesné hodnoty, které jim byly sděleny řídicím letového provozu.

Nicméně i přes všechny tyto limitace jsem se byl schopen za pomoci svého vedoucího práce dostat k vytyčeným výsledkům, které značně ovlivnily můj postoj k výkonnosti letadel. Cílem této práce nebylo obvinít výrobce ze špatně naměřených hodnot v příručce, spíše pak poukázat na fakt, že těchto hodnot je zkrátka téměř nemožné dosahovat za normálního provozu. Během práce jsem tak pochopil, jak zásadní je důkladná příprava a výpočty výkonností. Tudíž v dalším počínání ve svém výcviku a budoucí kariéře pilota k nim budu přistupovat s mnohem větším důrazem.



Seznam použité literatury a zdroje

- [1] *Commission Regulation (EU) No 965/2012: Air operations*. In: European Union Aviation Safety Agency, 2012. Dostupné také z:
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32012R0965&qid=1649401475582>
- [2] AIRBUS S.A.S. *Accidents by Flight Phase* [online]. Dostupné z:
<https://accidentstats.airbus.com/statistics/accident-by-flight-phase>
- [3] ICAO Doc 7300: *Convention on International Civil Aviation*. In: International Civil Aviation Organisation, 2006, číslo 9. Dostupné také z:
https://www.icao.int/publications/Documents/7300_9ed.pdf
- [4] *REGULATION (EC) No 216/2008 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL*. In: THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL, 2008. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008R0216&from=CS>
- [5] Agentura Evropské unie pro bezpečnost letectví (EASA). *Evropská unie* [online]. [cit. 2022-08-08]. Dostupné z:
https://european-union.europa.eu/institutions-law-budget/institutions-and-bodies/institutions-and-bodies-profiles/easa_cs
- [6] *Air Law: ATPL Ground Training Series*. CAE Oxford Aviation Academy, 2016.
- [7] *Easy Access Rules for Air Operations (Regulation (EU) No 965/2012)*. In: 2022, číslo 18. Dostupné také z:
<https://www.easa.europa.eu/document-library/easy-access-rules/easy-access-rules-air-operations-regulation-eu-no-9652012>
- [8] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. *Annex 8 – Airworthiness of Aircraft*. International Civil Aviation Organization, 2005. ISBN 978-92-9231-459-0
- [9] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. *Annex 2 – Rules of the Air*. International Civil Aviation Organization, 2005. ISBN 978-92-9231-459-0



- [10] NAŘÍZENÍ EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (ES) č. 216/2008. In: . 2008.
Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:02008R0216-20160126&from=EN>
- [11] LETECKÝ PŘEDPIS: LETIŠTĚ L14. In: MINISTERSTVO DOPRAVY ČESKÉ REPUBLIKY, 2009. Dostupné také z:
https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-14/data/print/L-14_cely.pdf
- [12] CESSNA AIRCRAFT COMPANY. [online]. Dostupné z: <https://cessna.txtav.com>
- [13] GARMIN INTERNATIONAL LTD. *Intefrated Flight Deck Pilot's Guide* [online].
Dostupné z: https://static.garmincdn.com/pumac/190-00498-07_0A_Web.pdf
- [14] *Učebnice pilota 2019: pro žáky a piloty všech druhů letounů a sportovních létajících zařízení, provozujících létání jako svou zájmovou činnost*. Cheb: Svět křídel, 2019. ISBN 978-80-7573-049-7
- [15] U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION – FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. *Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge* [online]. Flight Standards Service, 2016. Dostupné z: https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2022-03/pilot_handbook.pdf
- [16] CAE OXFORD AVIATION ACADEMY. *Mass and balance, Performance*. CAE Oxford Aviation Academy, 2014.
- [17] CAE OXFORD ACADEMY. *Principles of Flight*. CAE Oxford Aviation Academy, 2014
- [18] SCHETZ, Joseph, FUHS, Allen. *Fundamentals of fluid mechanics*. John Wiley & Sons, 1999.
- [19] CESSNA AIRCRAFT COMPANY. *Pilot's Operating Handbook – Cessna 172 Skyhawk*. Cessna Aircraft Company, 2007.
- [20] ČESKÁ REPUBLIKA. *LETECKÝ PŘEDPIS: LETOVÁ ZPŮSOBILOST LETADEL L8*. In: . MINISTERSTVO DOPRAVY ČESKÉ REPUBLIKY. Dostupné také z:
https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-8/data/print/L_8-cely.pdf



- [21] ZHU, YAJUAN a JIANGFENG WANG. *CALCULATION OF TAKEOFF AND LANDING PERFORMANCE UNDER DIFFERENT ENVIRONMENTS*. Dostupné z:
doi:10.1142/S2010194516601745
- [22] AGRAWAL, Satish K. *Braking performance of aircraft tires*. Dostupné z:
doi:10.1016/0376-0421(86)90002-3
- [23] PYTKA, Jarosław. *Measurement of aircraft ground roll distance during takeoff and landing on a grass runway*. Dostupné z: doi:10.1016/j.measurement.2022.111130
- [24] LKHK - Hradec Králové. *VFR příručka* [online]. [cit. 2022-08-08]. Dostupné z:
https://aim.rlp.cz/vfrmanual/actual/lkhk_text_cz.html