



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

## VYUŽITÍ GPS PRO MĚŘENÍ ZA LETU

USE GPS FOR IN FLIGHT MEASUREMENT

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Markéta Čížková

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Ivo Jebáček, Ph.D.

BRNO 2019



# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Letecký ústav
Studentka:	<b>Markéta Čížková</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	<b>doc. Ing. Ivo Jebáček, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Využití GPS pro měření za letu

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Lokalizace polohy pomocí systému GPS je dnes velmi rozšířený nástroj, který každý den využívá značná část populace. Rovněž v letectví je využití tohoto systému běžnou součástí letů i za podmínek VFR. Z tohoto důvodu se jedná o dobrý nástroj pro stanovení polohy letounu. Avšak pro letová měření, která mohou být součástí průkazných zkoušek, se sebou tento systém přináší problémy v definici přesnosti či jeho kalibrace. Tato práce má za cíl se zabývat možnostmi použití GPS s ohledem na výše zmíněné problémy.

### Cíle bakalářské práce:

- teoretické osvojení principu Globálního Polohového Systému
- stanovení možnosti definice přesnosti
- definice možnosti pro použití při zkouškách za letu

### Seznam doporučené literatury:

DANĚK, M. Zkoušení letadel za letu. VUT Brno, 1993.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce Využití GPS pro měření za letu se zabývá otázkou použitelnosti Globálního Pozičního Systému jako nástroje pro certifikaci letounů. Teoretická část práce má za cíl osvojení principu GPS, věnuje se přesnosti systému a způsobu certifikace. Praktická část obsahuje srovnání měření výšky pomocí GPS a Pitot-statického systému při klouzavém letu.

### **Klíčová slova**

GPS, letadla, letové zkoušky, metody zkoušení letadel, zkoušení za letu

## **ABSTRACT**

Bachelor thesis Use GPS for In-Flight Measurement addresses the applicability of Global Positioning System as a tool for aircraft certification. The theoretical part of thesis aims to acquire the GPS principle, it deals with accuracy of the system and methods of certification. The practical part contains a comparison of altitude measurement using GPS and Pitot-static system in a gliding flight.

### **Key words**

Aircraft, flight test, GPS, In-Flight Measurement, methods of aircraft testing

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ČÍŽKOVÁ, Markéta. *Využití GPS pro měření za letu*. Brno 2019. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. 52 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Ivo Jebáček, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Využití GPS pro měření za letu** vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

---

Datum

---

Markéta Čížková

## **PODĚKOVÁNÍ**

Ráda bych touto cestou poděkovala svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Ivo Jebáčkovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky a zejména za úsilí, které vložil do praktického měření. Díky patří i mým rodičům za podporu v průběhu studia.



## Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>TEORETICKÁ ČÁST</b>	<b>11</b>
2.1	GPS	11
2.1.1	<i>Historie navigace</i>	11
2.1.2	<i>Vznik GPS</i>	11
2.1.3	<i>Charakteristika GPS</i>	12
2.1.4	<i>Signál GPS</i>	14
2.1.5	<i>Měřené veličiny</i>	15
2.2	PŘESNOST GPS	16
2.2.1	<i>Vliv pohybu přijímače na přesnost</i>	16
2.2.2	<i>Výpočet přesnosti a správnosti měření</i>	16
2.2.3	<i>Vliv rozmístění satelitů na přesnost měření</i>	18
2.2.4	<i>Výpočet DOP</i>	19
2.3	KALIBRACE	21
2.4	SOUČASNÁ POZICE GPS V LETECTVÍ	24
<b>3</b>	<b>ZKOUŠENÍ LETADEL ZA LETU</b>	<b>26</b>
3.1	ROZDĚLENÍ ZKOUŠEK ZA LETU	26
3.2	POŽADAVKY NA VLASTNOSTI MĚŘÍČHO ZAŘÍZENÍ	26
3.3	MĚŘENÉ VELIČINY	26
3.4	CERTIFIKAČNÍ SPECIFIKACE	27
3.4.1	<i>Kalibrace vzdušné rychlosti</i>	27
3.4.2	<i>Pádová rychlost (<math>V_{S1}</math>)</i>	30
3.4.3	<i>Vzletové rychlosti</i>	31
3.4.4	<i>Měření vzdáleností</i>	32
3.4.5	<i>Stoupání</i>	34
3.4.6	<i>Klouzavý let</i>	36
<b>4</b>	<b>PRAKTICKÉ MĚŘENÍ</b>	<b>37</b>
4.1	POPIS METODY	37
4.2	PŘÍSTROJOVÉ VYBAVENÍ	38
4.2.1	<i>Výpočet těžiště</i>	39
4.3	ZPRACOVÁNÍ DAT	40
4.4	VYKRESLENÍ POLÁRY	42
<b>5</b>	<b>VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ</b>	<b>44</b>
<b>6</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>45</b>
	POUŽITÉ ZDROJE	46
	ZDROJE OBRÁZKŮ	48
	SEZNAM OBRÁZKŮ	50
	SEZNAM TABULEK	51
	SEZNAM ZKRATEK	51
	SEZNAM SYMBOLŮ	52

# 1 Úvod

GPS je v dnešní době tak rozšířenou technologií, že si spousta z nás určitě ani neuvědomuje, jaké komplikace by nám její případný výpadek způsobil.

Zapínáme ji pokaždé, když sedáme do auta, a to dokonce když se vydáváme na cestu, kterou dobře známe. Dnešní přijímače GPS signálu nám umí i známou cestu zrychlit či zpříjemnit. Upozorňují nás na uzavírky nebo nehody, vyhledávají nejbližší čerpací stanici či bankomat.

GPS dal dokonce vzniknout sportu, který je založený na hledání místa pouze na základě znalosti jeho souřadnic. Říká se mu Geocaching a svůj vznik datuje od roku 2000, tedy roku, kdy USA odstranily umělou odchylku, která do té doby ovlivňovala přesnost GPS.

I bez umělé odchylky se ale udává přesnost systému GPS pro běžné uživatele v řádu desítek metrů. Pro cestu na dovolenou je to více než dostačující. Tato práce se ale zabývá otázkou, jestli je možné využít GPS pro jiné než rekreační účely.

Učebnice pro piloty výslovně zrazují od používání GPS jako jediného nástroje pro orientaci. Poukazují na nespolehlivost a chybovost systému.

Cílem této práce je odpovědět na otázku, jestli je možné použít GPS pro certifikaci nových letounů a ušetřit tak letový čas zkoušek, který je velice drahý.

## 2 Teoretická část

### 2.1 GPS

#### 2.1.1 Historie navigace

Pokud dnes mluvíme o navigaci, máme většinou na mysli přijímač signálu GPS. To je ovšem význam přenesený. Navigace jako činnost byla totiž člověku známá dávno před tím, než dosáhl takové technické vyspělosti, která mu umožnila stavbu globálního pozičního systému.

Každý z nás naviguje denně. Většinou používáme navigaci podle orientačních bodů. Například po cestě do školy nebo do práce. Svě okolí neustále porovnáváme s naší pamětí a podle ní upravujeme trasu až ke kýženému cíli.

Se stále rostoucí globalizací ale tato metoda přestávala být pro člověka dostačující. Například na moři navigaci podle orientačních bodů použít nelze. Bylo tedy zapotřebí vyvinout jiné metody, jako jsou navigace podle hvězd či navigace výpočtem.

Tyto metody vydržely překvapivě dlouhou dobu. Posun v navigaci představovaly až vynálezy 20. století. První gyroskopický kompas, jehož výhodou je, že není ovlivňován magnetickou deklinací, a tedy vždy ukazuje zeměpisný sever, byl objeven v roce 1907 [1]

První funkční radar (zkr. z anglického *radio detection and ranging*) byl sestaven roku 1935, tedy až po skončení první světové války. Bylo možné díky němu určit polohu, rychlost a směr pohybu pozorovaného objektu. Pro navigaci byl přínosný hlavně za zhoršené viditelnosti, ale omezoval jej dosah. [2]

Během druhé světové války vyvinuly Spojené státy americké radionavigační systém Loran (z ang. *Long Range Navigation*). Využívalo jej především námořnictvo. I přes svou provozní náročnost je v poslední době jeho verze Loran-C velmi diskutovaná jako základ pro eLoran. Kombinace GPS se systémem eLoran přináší značné rozšíření schopností navigačního systému, eLoran dokáže například oproti GPS zorientovat mapu i když se přijímač signálu nepohybuje.

#### 2.1.2 Vznik GPS

V 60. letech 20. století vybudovalo ministerstvo obrany USA první družicový navigační systém Transit. Systém využívaly letadlové lodě a jaderné ponorky. Transit ale neumožňoval nepřetržité měření polohy. Z toho důvodu bylo zapotřebí dokonalejšího systému.

V únoru 1978 byla vypuštěna první družice programu GPS-NAVSTAR. Blok I obsahoval celkem 11 družic. V únoru 1989 odstartovala první družice bloku II, který byl určen k nahrazování družic bloku I a k jejich doplnění až na plně funkční stav 27.4. 1995, kdy bylo dosaženo FOC (*Full Operational Capability*). Původně čistě vojenský systém byl v 80. letech uvolněn i pro civilní použití. [3]

25. března 1991 byl z bezpečnostních důvodů zaveden selektivní přístup SA (*Selective Availability*), který pro civilní uživatele znamenal umělou odchylku 100 metrů horizontálně a 156 metrů vertikálně. Po ohromném tlaku uživatelů byl ale tento přístup o deset let později zrušen.

Předpokládaná životnost družic byla 7,5 roku. Nejstarší družice slouží od roku 1993. [4]

23. prosince 2018 byla úspěšně vypuštěna družice Vespucci, první z plánovaných třiceti dvou družic bloku III. V létě 2019 by měla odstartovat druhá.

### **2.1.3 Charakteristika GPS**

*Global Position System* (GPS) je vojenský družicový navigační systém. Je tvořen soustavou družic NAVSTAR GPS, které jsou řízené vládou USA.

#### **2.1.3.1 Kosmický segment**

Kosmický segment obsahuje jednatřicet družic, které obíhají zemi v šesti rovinách po téměř kruhových drahách ve výšce 20 200 kilometrů nad povrchem. Doba jednoho oběhu kolem Země je přibližně 12 hodin.

K zajištění funkčnosti na celém světě je zapotřebí dvacet čtyři satelitů, protože ke spolehlivému určení polohy a nadmořské výšky potřebuje přijímač informaci z alespoň čtyř družic, které musí být pro pozorovatele nad horizontem.

Každá družice je vybavena přijímačem, vysílačem, atomovými hodinami, procesory a dalšími přístroji, které slouží většinou k vojenským účelům, například k detekci jaderných výbuchů. [5]

K přesnému měření času využívají družice vodíkový maser. Jeho vysoká stabilita frekvence z něj vytváří velmi přesné hodiny s teoretickou odchylkou jedné sekundy za několik milionů let. [6]

Družice od vypuštění pracuje nepřetržitě až na krátké odstávky pro údržbu. Jednou ročně je nutné provést korekci oběžné dráhy družic, které mají tendenci se vzdalovat. Korekci dráhy zajišťují raketové motory, přísun energie pak sluneční články.

### 2.1.5 Měřené veličiny

Systém GPS pracuje s elektromagnetickým vlněním, to je určeno frekvencí  $f$ , periodou  $P$ , vlnovou délkou  $\lambda$  a rychlostí šíření  $c$ . Pokud předpokládáme konstantní frekvenci a nulovou počáteční fázi v čase  $t_0$ , bude fáze v okamžiku vysílání

$$\varphi = f \cdot t \quad (2.4)$$

Fáze přijímaného signálu potom odpovídá

$$\varphi = f(t - \tau) \quad (2.5)$$

kde  $\tau$  je doba potřebná k překonání vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem.

Pro určení polohy je důležité určit, jak daleko se přijímač od družic nachází. Zjištěné vzdálenosti vytvářejí kolem družic koule, v průsečíku těchto koulí pak předpokládáme polohu přijímače. Poloměry těchto koulí nazýváme pseudovzdálenost  $D_0$ .

Pseudovzdálenost získáváme nepřímo z dat, která poskytují družice metodou kódového měření.

#### 2.1.5.1 Kódová měření

Přijímač zpracovává PRN kód (C/A a P kód), který nese přesnou informaci o čase. Demodulací signálu získáváme čas  $\tau$  potřebný pro překonání vzdálenosti družice-přijímač. Pseudovzdálenost je pak dána vztahem

$$D_0 = c \cdot \tau \quad (2.6)$$

kde  $c$  je rychlost světla ve vakuu ( $c=299\,792\,458\text{ ms}^{-1}$ ).

Takto získaná pseudovzdálenost je zatížena chybou synchronizace přijímače se systémovým časem GPST.

#### 2.1.5.2 Fázová měření

Fázové měření na rozdíl od kódových pracují s vlastní nosnou vlnou. Přijímač počítá svou vzdálenost od družice na základě počtu vlnových délek. Desetinnou část vlny je možné určit přesně. Problémy nastávají při určování počtu celých vlnových délek, protože není možné určit čas, kdy byla vlna odeslána. Tento problém nazýváme celočíselná nejednoznačnost a je řešen několika metodami, například metodou OTF (*On The Fly*). [12]

#### 2.1.5.3 Dopplerovská měření

Dopplerovský posun frekvence se měří přímo na nosné vlně. Dopplerovská měření nejsou příliš vhodná pro určování polohy, využívají se spíše pro určování rychlosti, kterou se přijímač pohybuje. [13]

### 2.1.3.3 Uživatelský segment

Uživatelský segment tvoří jednotlivé přijímače GPS. Přijímač je tvořen anténou, radiofrekvenční jednotkou, mikroprocesorem, komunikační jednotkou paměti a zdrojem napětí. [10]

Vzhledem k tomu, že primární využití GPS je vojenské, je žádoucí, aby přijímače signálu byly pasivní kvůli ochraně před lokalizací. Spojení mezi družicí a přijímačem by vyžadovalo velké množství energie, proto se pro zpracování signálu používá metoda statistického vyhodnocení.

### 2.1.4 Signál GPS

Systém GPS využívá přesné kmitočtové a časové informace, které jsou vysílány družicemi jako složité pseudonáhodné šumové kódy (PRN – *Pseudo Random Noise*). Nejsou nositelem datových informací, zajišťují pouze přenos časových značek. Signály se odvozují od základní frekvence  $f_0 = 10,23 \text{ MHz}$  udržované pomocí rubidiových a cesiových hodin.

Násobením základní frekvence  $f_0$  vznikly tři nosné frekvence. [11]

$$L_1 \dots 154 \times f_0 = 1575,42 \text{ MHz } (\approx 19,05 \text{ cm}) = f_1 \quad (2.1)$$

$$L_2 \dots 120 \times f_0 = 1227,60 \text{ MHz } (\approx 24,45 \text{ cm}) = f_2 \quad (2.2)$$

$$L_3 \dots 135 \times f_0 = 1381,05 \text{ MHz} \quad (2.3)$$

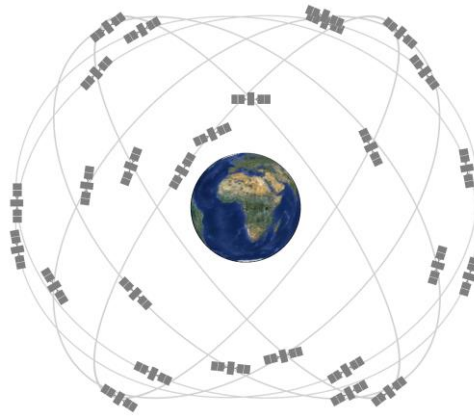
Pseudonáhodný C/A kód (*Clear/Access* – volný přístup) je veřejně přístupný kód, vysílaný na nosné frekvenci L1 o taktové frekvenci odpovídající desetina základní frekvence, tedy 1.023 MHz. Perioda  $T = 1 \text{ ms}$  odpovídá vlnové délce 293 m. Je tvořen sledem 1023 dvojkových nul a jedniček. Je tvořeno 32 variant C/A kódu z důvodu potřeby odlišení družic.

Pseudonáhodný P kód (*Protected* – chráněný, *Precise* – přesný) je určen pro vojenské účely. Jeho taktová frekvence je 10,23 MHz, vlnová délka tedy 29,3m.

Šifrovaný P kód se označuje jako Y kód. Y kód jsou schopni dešifrovat pouze autorizovaní uživatelé, rovnice k dekodování jsou tajné.

Mimo C/A a P kód přenáší nosná frekvence navigační zprávu. Navigační zpráva je důležitá hlavně z toho důvodu, že obsahuje data o přesné poloze družice v momentě odeslání dálkoměrného kódu, které jsou pro určení polohy nezbytné.

Navigační zpráva dále obsahuje data o stavu každé družice, efemeridy, korekce hodin, vojenské údaje a jiné.



Obrázek 2.1 Dráhy družic GPS [7]

### 2.1.3.2 Řídící segment

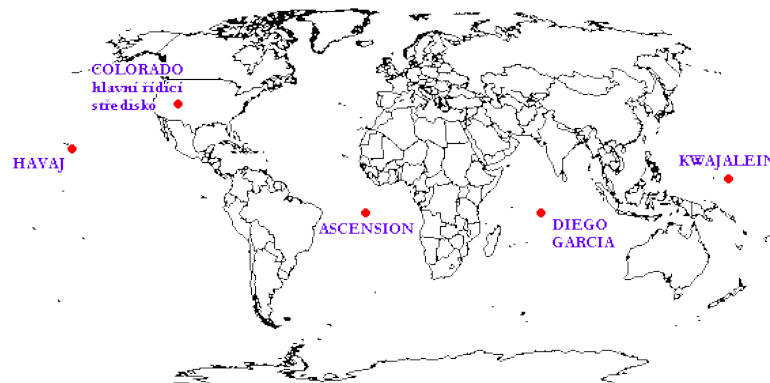
Řídící segment má za úkol monitorovat družice a získané informace spolu s efemeridy předávat zpět družicím.

Řídící segment GPS tvoří pět monitorovacích stanic, tři pozemní vysílače povelů a hlavní řídicí středisko.

Monitorovací stanice jsou se nacházejí podél rovníku: na Havajských ostrovech, na atolu Kwajalein na Marshallových ostrovech v západním Tichomoří, na ostrově Ascension ve středním Atlantiku, na ostrově Diego Garcia v Indickém oceánu a v Colorado Springs v USA.

Pozemní vysílače jsou na ostrovech Ascension, Diego Garcia, na atolu Kwajalein a na Havaji.

Hlavní pozemní stanice se nachází na základně Falcon AFB v Coloradu, hlavní řídicí středisko na Schrieverově letecké základně v Colorado Springs v Coloradu a celý systém řídí ředitelství Navstar, umístěné na letecké základně v Los Angeles. [8]



Obrázek 2.2 Řídící segment GPS [9]

## 2.2 Přesnost GPS

Přesnost systému GPS závisí na velkém množství různých parametrů. Chyba může být způsobena nevhodnou konstelací družic nebo dokonce relativistickým efektem. Největší dopad má nepřesná synchronizace hodin. Chyba 1 ns v měření času odpovídá chybě 0,3 m v měření vzdálenosti. [14]

Mezi další významné vlivy na přesnost patří průchod signálu atmosférou. Pseudovzdálenost je počítána pomocí rychlosti světla. Rychlost šíření světla se ale mění v závislosti na tom, jakým prostředím prochází. Atmosféra navíc obsahuje vodní páry, ty způsobují ohyb a lom signálu.

Při výpočtu pseudovzdálenosti jsme schopni některé vlivy eliminovat zahrnutím korekcí. Využívají se korekce chyb efemerid družic a korekce vlivu ionosféry a troposféry atd.

V zalesněných nebo hustě obydlených oblastech dochází k odrazu signálu, což také negativně ovlivňuje přesnost. Tento jev nazýváme multipath.

Přesnost kódových a fázových měření je funkcí vlnové délky. V současnosti je možné vlnovou délku měřit s přesností 1 %. GPS využívá signály o vlnových délkách 300 m, 30 m, 0,19 m a 0,24 m. Příslušné vlnové délky jsme tedy schopni určit s přesností 3 m, 0,3 m a 2 mm. [15]

Tato přesnost zahrnuje pouze nepřesnost při zpracování, nepočítá s průchodem atmosférou, odrazem a dalšími vlivy. I při použití korekcí je reálná přesnost samozřejmě nižší.

### 2.2.1 Vliv pohybu přijímače na přesnost

Pohyb přijímače má na přesnost jednoznačně negativní vliv v případě, že přijímač ztrácí spojení se satelitem. Po zachycení signálu ze satelitu přechází přijímač do sledovacího režimu. Pokud je spojení přerušeno, je přijímač nucen satelit znovu hledat. V některých extrémních případech, například při změnách rychlosti a směru pohybu, se může stát, že se spojení nepodaří obnovit, dokud se pohyb znovu neustálí.

### 2.2.2 Výpočet přesnosti a správnosti měření

Pro popis spolehlivosti GPS se používají dva termíny precision a accuracy. Accuracy je míra podobnosti mezi odhadem a skutečnou, ač neznámou, hodnotou. Precision pak vyjadřuje, jak moc se od sebe jednotlivé výsledky číselně liší. Pokud mluvíme o přesnosti, máme většinou na mysli kombinaci těchto dvou hodnot.



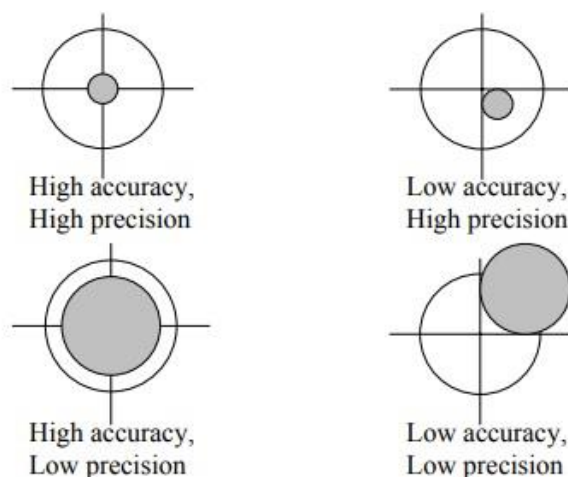
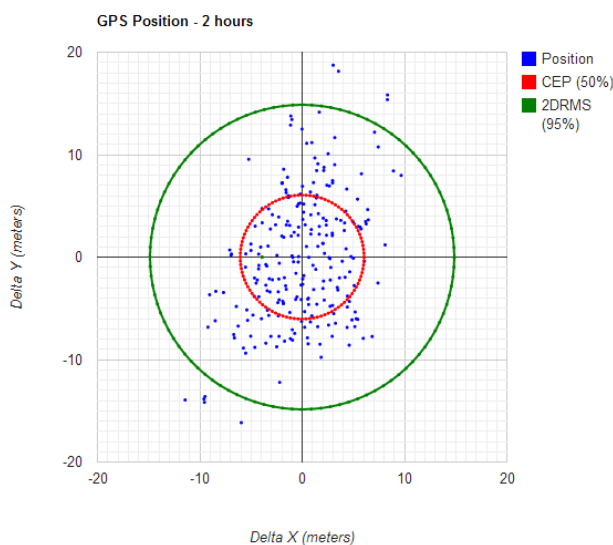


Figure 1: Accuracy versus Precision

Obrázek 2.3.3 Vztah mezi správností a přesností [16]

I pokud se přijímač vůči zemi nepohybuje, jeho poloha vypočítaná GPS se v důsledku chyb měření mění. Takto získané body mají rozptyl, který se používá k výpočtu přesnosti.



Obrázek 2.4 Rozptyl [17]

Při počítání přesnosti (accuracy) potřebujeme vztažný bod, který získáme výpočtem průměrné pozice nebo použitím bodu, jehož souřadnice jsou známy. Vztažný bod je důležitý pro určení směrodatné odchylky  $\sigma$ .

Směrodatnou odchylku používáme pro určení přesnosti s různými stupni spolehlivosti.

Pro 2D měření platí:

Spolehlivost měření	Vzorec	Pravděpodobnost	Popis
DRMS (Distance Root Mean Squared)	$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$	65 %	Druhá odmocnina čtvercových chyb
2DRMS	$2\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$	95 %	DRMS s pravděpodobností 95 %
CEP (Circular error probable)	$0,62\sigma_y + 0,56\sigma_x$	50 %	Poloměr kružnice se středem na skutečné pozici, obsahující odhad pozice s pravděpodobností 50 %.
R95	$R(0,62\sigma_y + 0,56\sigma_x)$	95 %	Poloměr kružnice se středem na skutečné pozici, obsahující odhad pozice s pravděpodobností 95 %.

Tabulka 3.2.1 Spolehlivost měření 2D [18]

Pro 3D měření platí:

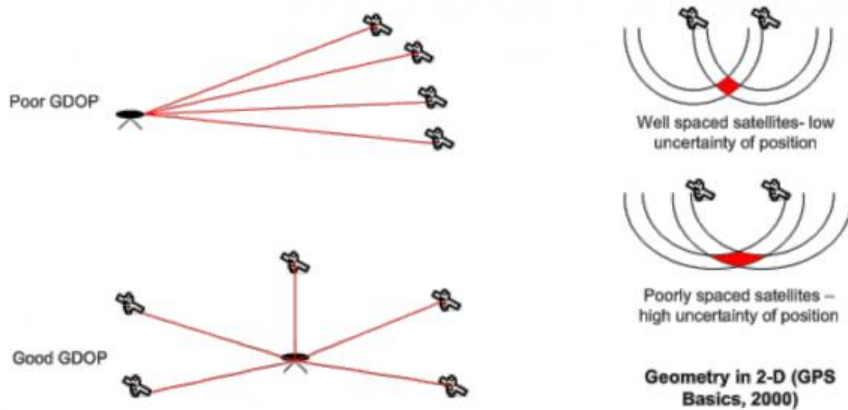
Spolehlivost měření	Vzorec	Pravděpodobnost	Popis
SEP (Spherical Error Probable)	$0,51(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$	50 %	Poloměr koule se středem na skutečné pozici, obsahující odhad pozice s pravděpodobností 50 %
MRSE (Mean Radial Spherical Error)	$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}$	61 %	Poloměr koule se středem na skutečné pozici, obsahující odhad pozice s pravděpodobností 61 %
90 % Spherical Accuracy Standard	$0,833(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$	90 %	Poloměr koule se středem na skutečné pozici, obsahující odhad pozice s pravděpodobností 90 %
99 % Spherical Accuracy Standard	$1,122(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$	99 %	Poloměr koule se středem na skutečné pozici, obsahující odhad pozice s pravděpodobností 99 %

Tabulka 3.2.2 Spolehlivost měření 3D [19]

### 2.2.3 Vliv rozmístění satelitů na přesnost měření

Satelity systému GPS nejsou geostacionární, to v praxi znamená, že se rozmístění satelitů, ze kterých je přijímač schopen získávat informace neustále mění. Problém nastává v momentě,

kdy se satelity dostanou do vzájemné blízkosti, signál přichází z podobných úhlů, pole možné polohy se zvětšuje, čímž klesá přesnost. Pokud se satelity nacházejí blízko nadhlavníku, projeví se to negativně na přesnosti horizontální polohy, pokud jsou blízko horizontu, je ovlivněna nadmořská výška. Tento problém se nazývá Dilution of precision (DOP).



Obrázek 2.5 Vliv Geometrie na přesnost [20]

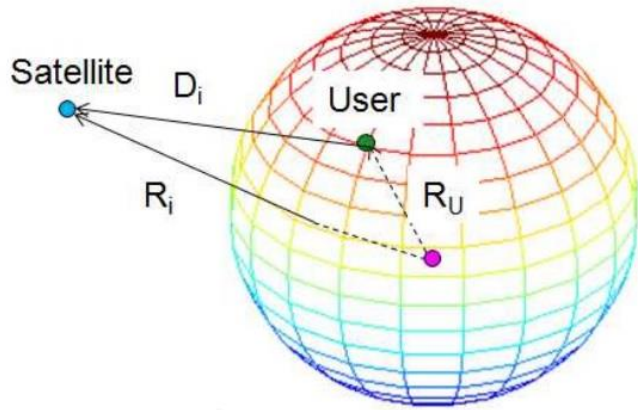
#### 2.2.4 Výpočet DOP

Pro výpočet DOP je třeba v první řadě znát směrový vektor od přijímače k družici. Pokud označíme  $x, y$  a  $z$  souřadnice přijímače a  $x_i, y_i$  a  $z_i$  souřadnice družice, pak je jednotkový vektor dán vztahem

$$e_i = \left( \frac{x_i - x}{r_i}, \frac{y_i - y}{r_i}, \frac{z_i - z}{r_i} \right) \quad (2.7)$$

kde  $r_i$  je

$$r_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} \quad (2.8)$$



Obrázek 2.6 Směrový vektor [21]

Pro výpočet DOP pro případ čtyř satelitů seřadíme vektory do matice:

$$G = \begin{bmatrix} \frac{x_1 - x}{r_1} & \frac{y_1 - y}{r_1} & \frac{z_1 - z}{r_1} & 1 \\ \frac{x_2 - x}{r_2} & \frac{y_2 - y}{r_2} & \frac{z_2 - z}{r_2} & 1 \\ \frac{x_3 - x}{r_3} & \frac{y_3 - y}{r_3} & \frac{z_3 - z}{r_3} & 1 \\ \frac{x_4 - x}{r_4} & \frac{y_4 - y}{r_4} & \frac{z_4 - z}{r_4} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

DOP pak získáváme z diagonálních prvků následující matice.

$$(G^T G)^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx}^2 & \sigma_{xy}^2 & \sigma_{xz}^2 & \sigma_{xt}^2 \\ \sigma_{yx}^2 & \sigma_{yy}^2 & \sigma_{yz}^2 & \sigma_{yt}^2 \\ \sigma_{zx}^2 & \sigma_{zy}^2 & \sigma_{zz}^2 & \sigma_{zt}^2 \\ \sigma_{tx}^2 & \sigma_{ty}^2 & \sigma_{tz}^2 & \sigma_{tt}^2 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$DOP = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2 + \sigma_{tt}^2} \quad (2.11)$$

[22]

Kromě DOP je možné určit i několik dílčích činitelů:

Zkratka	Název	Vzorec
HDOP	horizontal dilution of precision	$\sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2}$
VDOP	vertical dilution of precision	$\sigma_{zz}$
PDOP	position (3D) dilution of precision	$\sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2}$
TDOP	time dilution of precision	$\sigma_{tt}$

Tabulka 3.2.3 Činitele DOP [23]

## 2.3 Kalibrace

Aby bylo možné použít GPS při certifikačních zkouškách, musí přijímač splňovat požadavky pro systém certifikovaný pro podávání informací o čase, prostoru a poloze TSPI (*Time Space Position Information*).

Kalibrace GPS se provádí na testovacích základnách. V České republice je referenčním etalonem polohy základna Výzkumného ústavu geodetického, topografického a katastrálního Skalka.

Při kalibraci je provedeno zaměření bodů testovací základny. Naměřená data jsou předána správci základny. Ten provede porovnání a vystavení kalibračního listu.

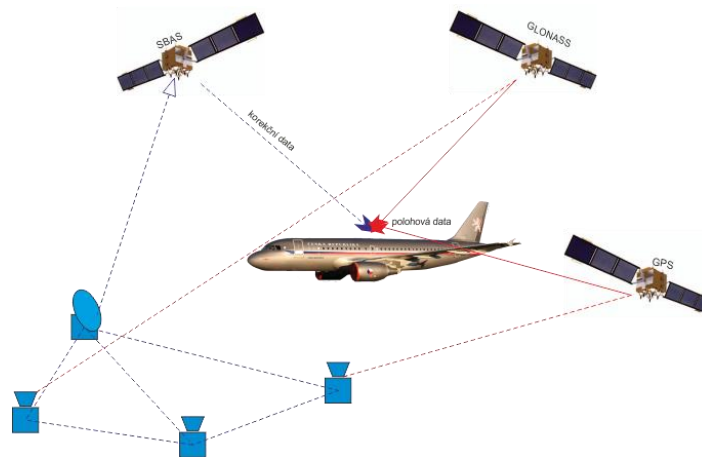
Kalibrační základna se skládá ze tří částí: vnitřní, vnější a navazovací základna.

Vnitřní základna obsahuje pět pilířů s nucenou centrací, která umožňuje ukotvení přijímače. [24]

## 2.4 Současná pozice GPS v letectví

Důvodem, proč GPS ještě stále není primárním navigačním systémem v letectví je jeho nedůvěryhodnost. Tento problém se GPS snaží řešit sledováním spolehlivosti jednotlivých segmentů. Pro řídicí a kosmický segment je to metoda S-BAS (*Satellite-Based Augmentation System*).

S-BAS je rozšiřující systém pozemních stanic, které vypočítávají korekce. Tyto informace jsou pomocí řídicích stanic předávány cílovému uživateli.

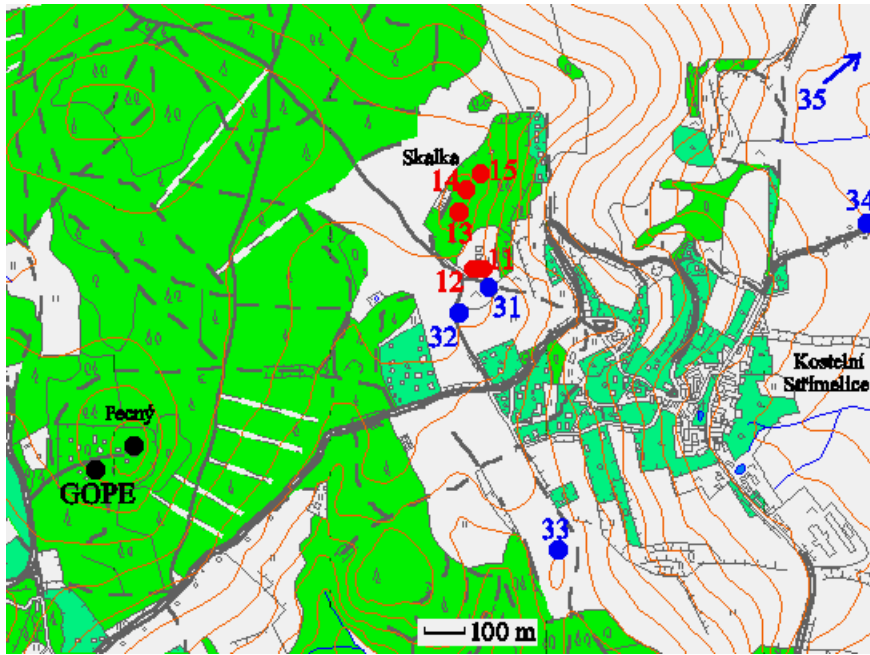


Obrázek 2.11 Princip S-BAS [30]

Pro uživatelský segment se používá metoda A-BAS (*Airborne-Based Augmentation System*). A-BAS obsahuje dvě metody, metoda RAIM (*Receiver Autonomous Integrity Monitoring*) se zabývá spolehlivostí a přesností přijímače, kdežto metoda AAIM (*Airborne Autonomous Integrity Monitoring*) využívá jiné palubní přístroje jako dohled nad fungováním GPS.

Metoda G-BAS (*Ground-Based Augmentation System*) je založena na principu diferenciálního navigačního systému. Na zemi je umístěn přijímač, jehož poloha je známá. Průběžným porovnáváním této polohy s polohou, kterou přijímač získá měřením, dostáváme časově proměnné chyby. Tyto chyby pak můžeme použít pro korekci měření i na palubě letadla, samozřejmě za předpokladu, že letadlo není od referenčního přijímače příliš vzdáleno a že jsme schopni přenášet chybu v reálném čase s co nejmenším zpožděním. [31]

Letecké GPS přijímače jsou na rozdíl od běžných přijímačů vybaveny navíc prvky Jeppesen databáze, která obsahuje informace o poloze míst, která jsou z hlediska letového provozu významná, například letiště nebo zakázané zóny.



Obrázek 2.9 Umístění pilířů testovací základny GPS [27]

Na obrázku 2.9 jsou v mapě červeně zanesené pilíře vnitřní základny, modře pilíře vnější základny.

Vnější základna je tvořena žulovými hranoly, polohu značí mosazný váleček. Body vnější základny jsou od vnitřní vzdálené 50 m, 150 m, 500 m, 1 km a 11 km. [28]



Obrázek 2.10 Bod vnější testovací základny GPS [29]





Obrázek 2.7 Pilíře vnitřní základny [25]



Obrázek 2.8 Nucená centrace na jednom z pilířů vnitřní základny [26]



Učebnice pro piloty považují GPS za vhodný doplněk ke klasické srovnávací navigaci, ale důrazně varují před přílišným spoléháním na GPS, protože v případě poruchy dochází ke ztrátě orientace.

GPS se ve spojení s digitální mapou používá pro registraci polohového a výškového průběhu letu. [32]

### 3 Zkoušení letadel za letu

Zkoušky za letu se v několika ohledech výrazně liší od zkoušek v laboratořích. Velkou roli hraje tlak a teplota v atmosféře v okamžiku měření. Výsledky je nutné redukovat na mezinárodní srovnávací atmosféru. Kromě tlaku a teploty se musí počítat s prouděním, které způsobuje rozptýl výsledků.

Zkoušky za letu jsou přirozeně podstatně nákladnější než v laboratoři, je tedy zapotřebí věnovat přípravě větší pozornost, aby nedocházelo k plýtvání letovým časem.

#### 3.1 Rozdělení zkoušek za letu

Podle účelu dělíme zkoušky na tři hlavní skupiny:

- Výzkumné zkoušky – zabývají se základními problémy aerodynamiky, mechaniky letu, konstrukce a pevnosti letounu
- Prototypové zkoušky – pomocí prototypové zkoušky zjišťujeme, zda bylo dosaženo vytyčených cílů, provádí se jako závěrečná fáze zkoušení prototypu
- Kontrolní zkoušky – zjišťují, jestli letadlo splňuje nároky, které jsou na něj kladeny

#### 3.2 Požadavky na vlastnosti měřicího zařízení

- Malá váha a objem
  - Přiměřená přesnost
  - Přiměřená citlivost (přiměřená nejmenší změna veličiny, kterou jsme schopni zaregistrovat)
  - Správnost (Má význam jen u ciferníkových přístrojů. Zajímá nás rozdíl mezi skutečnou hodnotou a údajem na ciferníku. Při měření za letu není správnost ciferníkových přístrojů vždy nutná, protože vždy vylučujeme systematickou chybu korekcí podle graduační křivky.)
  - Věrnost reprodukce
  - Necitlivost na rušivé vlny (jako jsou: teplota, vibrace, zrychlení, změna tlaku atd.)
  - Stálost funkce
  - Snadná montáž a provoz
  - Možnost synchronizace údajů
  - Nesmí rušit funkci jiných zařízení
- [33]

#### 3.3 Měřené veličiny

Na letoun ve vzduchu působí síly a momenty, které závisí zejména na charakteristických veličinách letounu, prostředí a letu.

Charakteristické veličiny letounu jsou rozměry, plochy, váha, centráž, momenty setrvačnosti letounu kormidel apod.

Prostředí je určeno tlakem, teplotou, hustotou, vazkostí a rychlostí zvuku.

Let charakterizují souřadnice trajektorie, rychlost, Machovo číslo, zrychlení, polohové úhly, úhly ofukování, úhlové rychlosti, výchyly kormidel a síly v řízení. [34]

### 3.4 Certifikační specifikace

Součástí Certifikačních specifikací pro letouny kategorie normální, cvičná, akrobatická a pro sběrnou dopravu CS-23 je oddíl Průvodce letovými zkouškami. Je členěn do šesti hlav:

- HLAVA1 – VŠEOBECNĚ
- HLAVA2 – LET
- HLAVA3 – NÁVRH A KONSTRUKCE
- HLAVA4 – POHONNÁ JEDNOTKA
- HLAVA5 – VYBAVENÍ
- HLAVA6 – PROVOZNÍ OMEZENÍ A INFORMACE

Pro potřeby této bakalářské práce byla použita především HLAVA2 – LET.

#### 3.4.1 Kalibrace vzdušné rychlosti

Pro měření vzdušné rychlosti a nadmořské výšky letadla používáme Pitot-statickou trubici, která měří statický a celkový Pitotův (dynamický) tlak. Je-li však Pitot-statická trubice upevněna na letadle, které při svém letu vytváří tlak, odečty dynamického a statického tlaku budou ovlivněny tlakovým polem letadla a prouděním pod úhlem. Takto způsobované chyby se nazývají polohové chyby, protože znaménko a velikost chyb jsou funkcí polohy Pitot-statické sondy na letadle. Polohová chyba je funkcí náběžného úhlu letounu a Machova čísla a stanovuje se při letových zkouškách.

##### 3.4.1.1 Metoda s využitím pozemní základny měření rychlosti

Metoda s využitím pozemní základny měření rychlosti používá pozemní referenční bod k určení rozdílu mezi indikovanou vzdušnou rychlostí a rychlostí letounu vůči zemi.

Je důležité přesně změřit pozemní úsek. Délka úseku by měla být zvolena tak, aby odpovídala vzdušné rychlosti, kterou letoun letí. Nadměrně dlouhé časy pro překonání úseku znehodnotí výsledky zkoušky.

Obecně by při použití pěti mílového úseku měla být rychlost vyšší než 250 uzlů, naopak na úseku pod 1 míli by rychlost neměla překročit 100 uzlů.

Vzduch by měl být co nejklidnější, s minimem turbulencí a větru. Rychlost větru při provádění zkoušky by neměla překročit 10 uzlů.

Vlastní zkouška spočívá ve stabilizovaném vodorovném letu zkušební rychlostí. V průběhu celého průletu úsekem je udržována konstantní rychlost, nadmořská výška a kurz. Jeden cyklus zkoušky obsahuje dva průlety úseku, každý opačným směrem.

Při metodě kalibrace systému pro indikaci vzdušné rychlosti při rozjezdu na zemi vstupují do měření chyby v důsledku dynamických účinků spojených se zrychlením. To způsobuje, že přístroje ukazují nižší než skutečnou vzdušnou rychlost.

Metoda s využitím průletu kolem řídicí věže zase umožňuje kalibrovat pouze zdroj statického tlaku, dynamický tlak se považuje za bezchybný.

GPS musí splňovat požadavky pro systém certifikovaný pro podávání informací o čase, prostoru a poloze TSPI (*Time Space Position Information*).

### 3.4.2 Pádová rychlost ( $V_{S1}$ )

Zkoušky pádové rychlosti je žádoucí provést na začátku programu zkoušek, protože několik předpisů je funkcí právě pádové rychlosti.

Většina standardních Pitot-statických systémů letounů byla pro stanovování pádové rychlosti shledána jako nepřijatelná z důvodu velkých náběžných úhlů. Tyto zkoušky vyžadují použití samostatného zkušebního systému pro měření vzdušné rychlosti.

Pro zkoušky pádové rychlosti se používají tyto zkušební systémy:

- Systémy s nosníky – výkyvné, na nosníku upevněné Pitot-statické systémy s dostatečným volným úhlem výkyvu, který pokryje rozsah náběžného úhlu letounu při přetažení nebo pevné Pitotovy hlavice s kompenzovaným náběžným úhlem
- Pitot-statické bomby – stabilní při všech obratech v přetažení
- Vlečné kužely – zdroj statického tlaku ve formě vlečného kužele dynamicky vyváženého s výkyvnou hlavou se zdrojem statického tlaku, nebo dynamicky vyváženého kužele s pevným zdrojem statického tlaku známé přesnosti v rozsahu náběžných úhlů odpovídajících přetažení

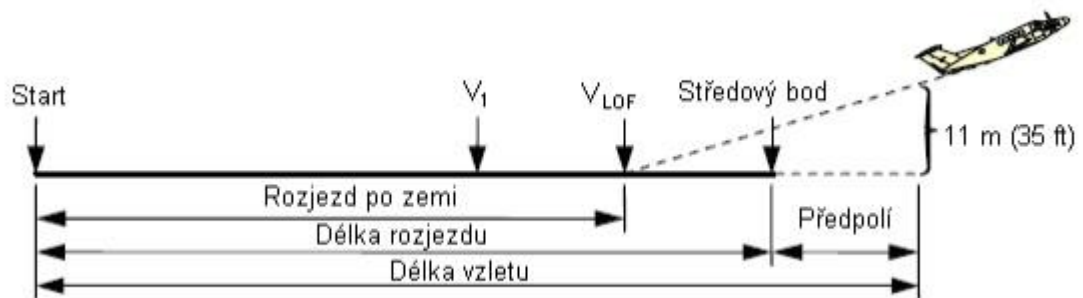
Zkouška by měla být zahájena při rychlosti přibližně  $1,5 V_{S1}$ , poté je rychlost snížena na 19 km/h (10 kt) nad pádovou rychlost. Rychlost je dále snižována maximálně o jeden uzel za sekundu až do přetažení nebo dosažení dorazu v řízení. [38]

#### 3.4.2.1 Využití GPS

Při měření s GPS nehraje úhel náběhu žádnou roli. Není zapotřebí instalovat zkušební zařízení vně letounu, na které je třeba brát zvláštní ohledy, jako je tomu například u Pitot-statické bomby, kdy je třeba postupovat opatrně při vybrání přetažení, protože hrozí nebezpečí odtržení od konce hadice.

Naopak problémy způsobuje nadmořská výška, která je pro zkoušení pádové rychlosti nezbytně vyšší než při zkoušení jiných rychlostí z důvodu bezpečnosti. Měřením GPS získáváme traťovou rychlost, tím vyvstává potřeba měřit rychlost větru, což je mimo letištní plochu problematické.

Stanovení délky rozjezdu je nepovinné. Délka rozjezdu je vzdálenost od startu do středu mezi bodem nadzdvihnutí a bodem, ve kterém letoun dosáhne výšky 11 m (35 ft) nad vzletovou dráhou, když dojde k poruše kritického motoru, která bude zjištěna při  $V_1$ .



Obrázek 3.5 Délka rozjezdu, Předpolí [42]

#### Dráha letu při vzletu

Dráha letu při vzletu začíná 11 m (35 ft) nad vzletovým povrchem na konci délky vzletu a končí, když je letoun ve výšce vyšší než 457 m (1 500 ft) nad vzletovým povrchem, nebo ve výšce, kdy je dosaženo letové konfigurace.

Čistá dráha letu při vzletu je skutečná dráha letu snižená o gradient 0,8 procent pro dvoumotorové letouny.

### 3.4.4 Měření vzdáleností

#### Délka přerušného vzletu

Délka přerušného vzletu se skládá ze tří vzdáleností. Z vzdálenosti nutné pro zrychlení letounu na rychlost  $V_{EF}$  (rychlost s vysazenou kritickou jednotkou), vzdálenosti nutné pro zrychlení na rychlost rozhodnutí  $V_1$  a ze vzdálenosti nutné pro následné zastavení.

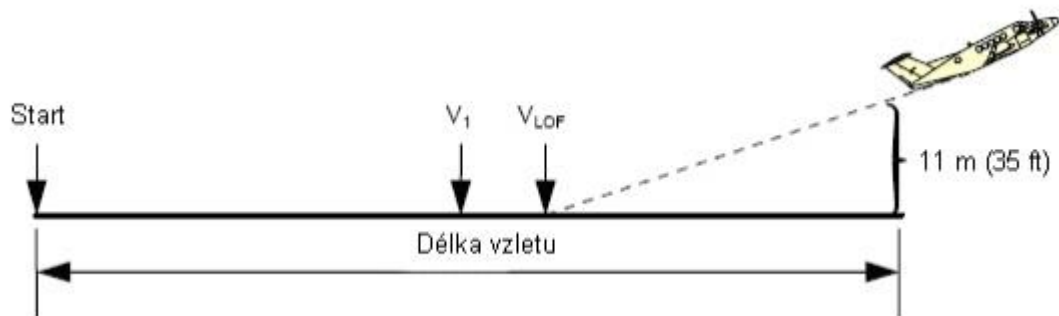
#### Dráha vzletu

Dráha vzletu je dráha potřebná k nastoupaní do 457 m (1500 ft) nad vzletovou rovinu s nefunkčním kritickým motorem.

#### Délka vzletu a rozjezdu

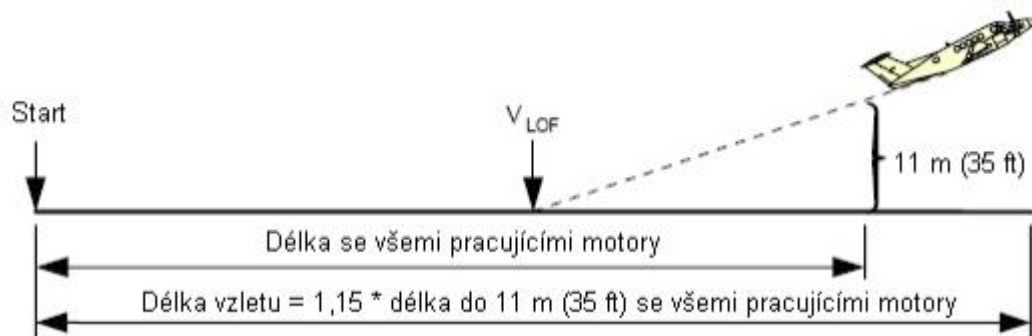
Délka vzletu je delší vzdálenost z následujících:

- Dráha potřebná k nastoupaní do 11 m (35 ft) s poruchou kritického motoru, která byla zjištěna při dosažení rychlosti rozhodnutí  $V_1$ .



Obrázek 3.3 Délka vzletu [40]

- Sto patnáct procent dráhy potřebné k nastoupaní do 11 m (35 ft) s pracujícími motory.



Obrázek 3.4 Délka vzletu 115 % délky se všemi pracujícími motory [41]

### 3.4.1.6 Kalibrace systému pro indikaci vzdušné rychlosti při rozjezdu na zemi

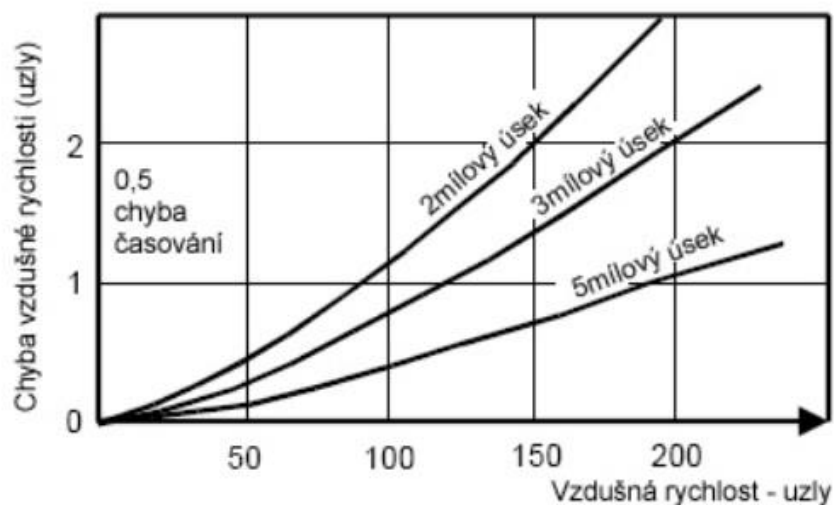
Pro kalibraci při rozjezdu na zemi se používají dvě metody:

- Metoda s využitím zapouzdřeného zdroje statického tlaku spočívá v porovnání vzdušné rychlosti indikované na ukazateli vzdušné rychlosti pro účely zkoušky a rychlosti na ukazateli vzdušné rychlosti, který bude zastavěn v letounu, při zrychlování na dráze
- Metoda s využitím jednotky pro měření vzdálenosti využívá odečty rychlostí vůči zemi ke stanovení kalibrované vzdušné rychlosti CAS. K rychlosti vůči zemi je připočítána složka větru. Takto získaná pravá vzdušná rychlost je vynásobena odmocninou z hustoty atmosféry podělené hustotou mezinárodní standardní atmosféry ISA, čímž se získává kalibrovaná vzdušná rychlost. [36]

### 3.4.1.7 Metoda s využitím GPS

Pro kalibraci vzdušné rychlosti už existuje uznaná metoda s využitím GPS. Postup zkoušky je prakticky stejný jako u metody s využitím pozemní základny měření rychlosti s tím rozdílem, že GPS stanovuje rovnou rychlost vůči zemi, ne čas průletu.

Metoda s využitím GPS má oproti jiným metodám kalibrace vzdušné rychlosti několik výhod. Metoda s využitím pozemní základny měření rychlosti využívá jako primární měřicí přístroj stopky, které jsou zdrojem značné chyby.



Obrázek 3.2 Graf závislosti chyby vzdušné rychlosti na vzdušné rychlosti a délce zkušební úseku [37]

Graf na obrázku 3.2 zobrazuje vliv vzdušné rychlosti letounu na chybu vzdušné rychlosti při různé délce měřeného úseku na zemi v důsledku 0,5sekudové chyby měření času. Z grafu vyplývá, že metoda je vhodná jen pro pomalu se pohybující letouny.

Metoda s využitím vodícího letounu počítá se dvěma paralelně letícími stroji. To násobí letový čas, což je drahé. Mimo to se na zkoušené letadlo přenáší chyby vodícího letounu.

Při každém pokusu zaznamenáváme dobu průletu, tlakovou nadmořskou výšku, celkovou teplotu vzduchu, indikovanou rychlost letu, polohu vztlakových klapek, polohu přistávacího zařízení a směr průletu. Rychlost vůči zemi se vypočítá ze vztahu

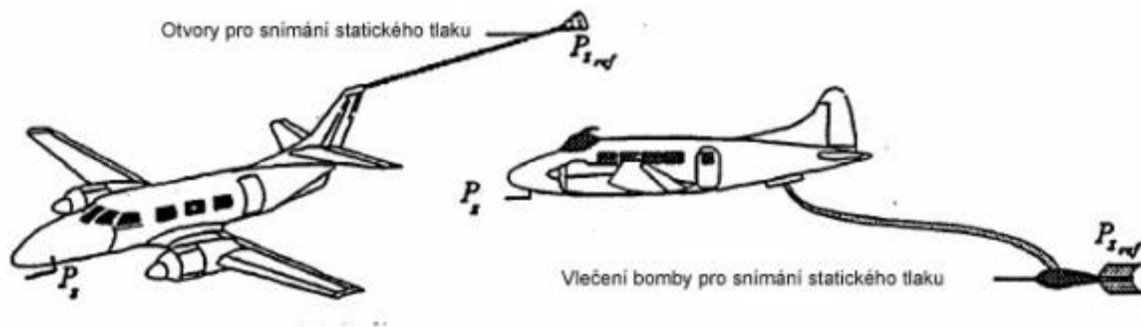
$$GS = \frac{C \times \text{délka úseku (ft)}}{\text{čas (s)}} \quad (3.1)$$

kde  $C = 0,5925$  pro uzly nebo  $C = 0,6818$  pro míle za hodinu.

Vypočítané rychlosti se za jeden cyklus zprůměrují. Vynásobením průměrné rychlosti koeficientem zohledňujícím tlakovou nadmořskou výšku se získává kalibrovaná rychlost letu.

### 3.4.1.2 Metoda s využitím vlečné bomby a kuželu

Vlečnou bombou nebo vlečným kuželem se měří statický tlak v okolí letadla. Rozdíl mezi referenční nadmořskou výškou získanou z vlečného kuželu nebo vlečné bomby a nadmořskou výškou letadla, je korekcí polohové chyby pro výškoměr.



Obrázek 3.1 Vlečná bomba a kužel [35]

### 3.4.1.3 Metoda s využitím vodícího letounu

Ke kalibraci je použit letoun, jehož Pitot-statický systém již kalibrací prošel. Vodící letoun letí se zkoušeným ve stejné výšce stejnou rychlostí v takové vzdálenosti, aby nedošlo k ovlivnění tlakových polí. Ke koordinaci odečtů se používá rádiové spojení.

### 3.4.1.4 Údaje z Pitot-statického nosníku

Pitot-statický systém je při zkoušce umístěn tak, aby nebyl ovlivněn prouděním pod úhlem, takové údaje můžeme považovat za vodící.

### 3.4.1.5 Metoda s využitím průletu kolem řídicí věže

Zkouška spočívá ve stabilizovaném průletu konstantní rychlostí ve výšce odpovídající výšce řídicí věže. Letadlo udržuje konstantní nadmořskou výšku. Věž měří výšku a relativní úhel letadla. Vzhledem k tomu, že systémy výškoměru a ukazatel vzdušné rychlosti využívají jeden zdroj statického tlaku, je možné z výškové chyby přímo určit chybu vzdušné rychlosti.



Řešením by mohl být postup používaný při kalibraci vzdušné rychlosti, kdy je zkouška složená z cyklu dvou po sobě jdoucích úseků po směru a proti směru větru. Odečtením průměrné rychlosti za cyklus od naměřené rychlosti je možné získat rychlost větru. I tato hodnota bude ovšem průměrná. Měření po směru větru a proti směru by musela následovat krátce za sebou a ani tak není možné s jistotou říci, že se povětrnostní podmínky nezměnily.

GPS pravděpodobně bez informace o rychlosti větru nezíská tak přesné výsledky, jako současné metody. Běžně využívané metody se se zkušným letadlem nachází ve stejné vzdušné mase, zatímco GPS nabízí pouze pohled spjatý s pevným povrchem.

### 3.4.3 Vzletové rychlosti

Rychlost rotace  $V_R$  je žadatelem volená rychlost při rotaci, moment, kdy letoun dostává pokyn ke ztrátě kontaktu s dráhou. Je to rychlost, pro kterou je prokázáno, že je bezpečná pro pokračování v letu, a to i při turbulenci, či ztrátě motoru.

Rychlost předpokládaného selhání motoru  $V_{EF}$  je kalibrovaná rychlost letu, při které se předpokládá selhání kritického motoru. Je volena žadatelem.

Rychlost rozhodnutí  $V_1$  je kalibrovaná rychlost letu, která udává nejzazší hranici, kdy je ještě možné vzlet přerušit.

Rychlost nadzdvihnutí  $V_{LOF}$  je kalibrovaná rychlost letu, při které se letoun poprvé zcela vznese.

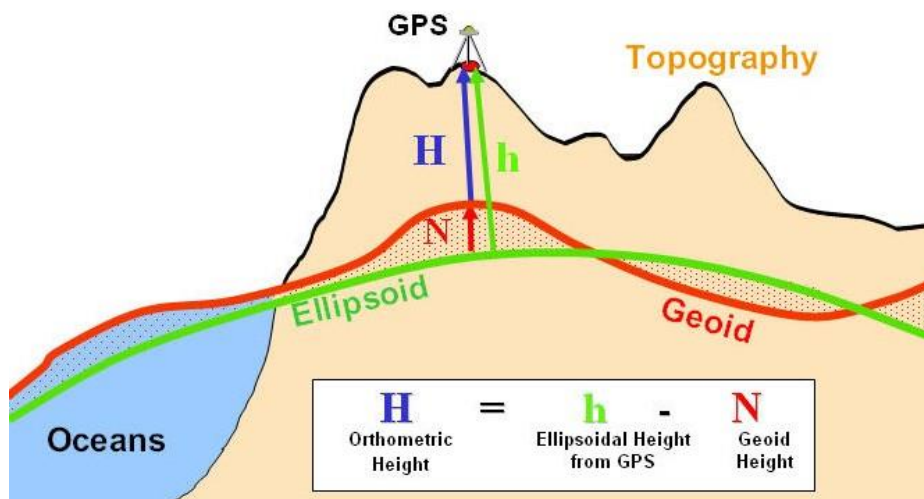
Bezpečná rychlost vzletu  $V_2$  je kalibrovaná rychlost letu, které se dosáhne v 11 m (35 ft) nad povrchem po selhání motoru při  $V_{EF}$ .

Minimální rychlost říditelnosti  $V_{MC}$  je kalibrovaná rychlost letu, při které je po vysazení kritického motoru možno obnovit řízení letadla a udržet přímočarý let stejnou rychlostí s úhlem náklonu menším než  $5^\circ$ . [39]

#### 3.4.3.1 Využití GPS

Využití GPS pro měření vzletových rychlostí se jeví jako nejméně problematické měření ze všech letových rychlostí. Vzhledem k tomu, že při zkoušení vzletových rychlostí se letoun přímo dotýká země nebo je ve výšce maximálně 11 m, mělo by být stanovení rychlosti větru mnohem snazší než při zkoušení pádové rychlosti.

GPS ale rychlost neměří přímo, zaznamenává polohu a čas a rychlost dopočítává. Z tohoto důvodu je GPS velmi nepřesný při malých rychlostech, kdy se rozdíl polohy jednotlivých bodů mění jen málo.



Obrázek 3.8 Rozdíly mezi elipsoidem a geoidem [47]

Vertikální přesnost GPS je běžně uváděná jako třikrát horší než horizontální. To vychází z geometrického principu systému. Vzhledem k tomu, že přijímač není schopen přijímat signál z družic, které jsou zastíněny Zemí, je nucen spolehnout se na informace přicházející z jednoho směru. Pro horizontální polohu je nejpřesnější, pokud jsou přijímače co nejdále od sebe, na jihu a na severu, na východě a na západě. Taková situace pro vertikální polohu nastat nemůže, kulové plochy tvořené pseudovzdáleností se tedy neprotínají ostře a vertikální přesnost je tím pádem nižší.

Pro měření stoupání ve smyslu výkonnostní charakteristiky by ale nic z toho nemělo představovat výrazný problém kdyby se měření omezilo na výškový rozdíl mezi dvěma body. Pokud je stanoven začátek a konec zkušební dráhy, bylo by možné stanovit nastoupanou výšku, bez vztahu k souřadnému systému. Takový výsledek by pouze informoval o výkonnosti stroje, nebylo by možné jej použít ke kalibraci přístrojů.

### 3.4.6 Klouzavý let

Klouzavý let je definován maximální vzdáleností v kilometrech, kterou je letoun bez pohonu schopen urazit z výšky 1000 m.

#### 3.4.6.1 Využití GPS

Klouzavý let charakterizuje rychlost opadání, kterou určíme z měření úbytku výšky za příslušný čas. GPS není vhodný pro měření vzdušných rychlostí, ale měl by splňovat požadavky na měření výšky u klouzavého letu. Pro určení klouzavosti totiž není důležitá absolutní výška, ale rozdíl mezi počáteční a koncovou délkou měření. Klouzavým letem se podrobněji zabývá praktická část.

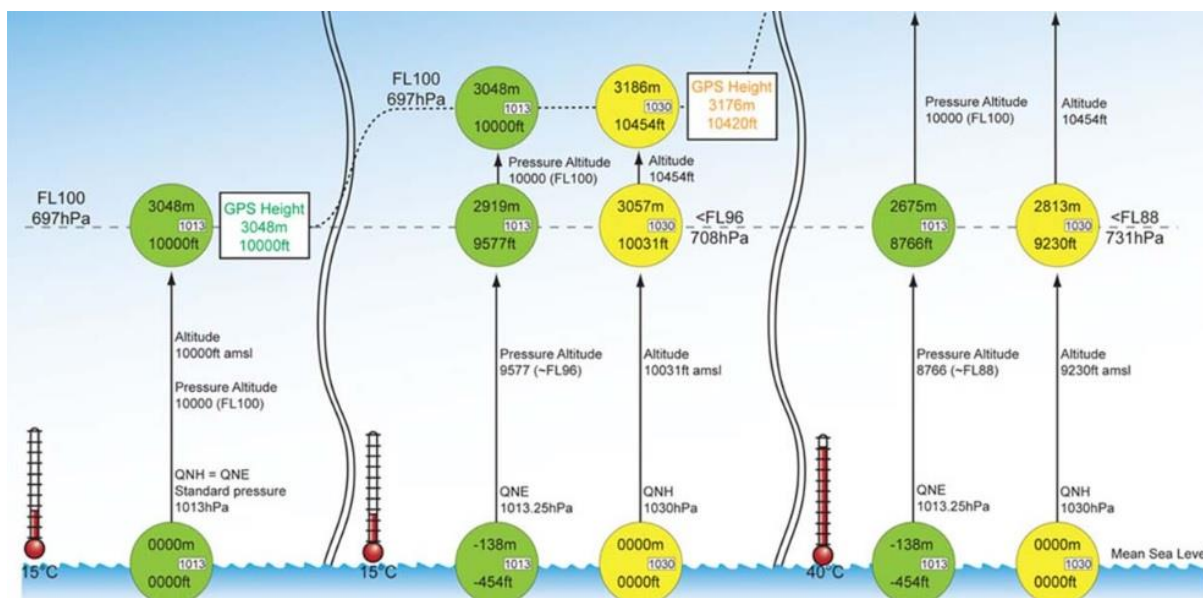
Pro odečty výškoměru jsou doporučeny intervaly menší než 30 sekund.

Svislá rychlost stoupání/klesání pozorovaná v podmínkách zkoušky by měla být větší než  $\pm 30$  m ( $\pm 100$  ft) za minutu, protože při nižší rychlosti bývají výsledky nespolehlivé. [45]

### 3.4.5.1 Využití GPS

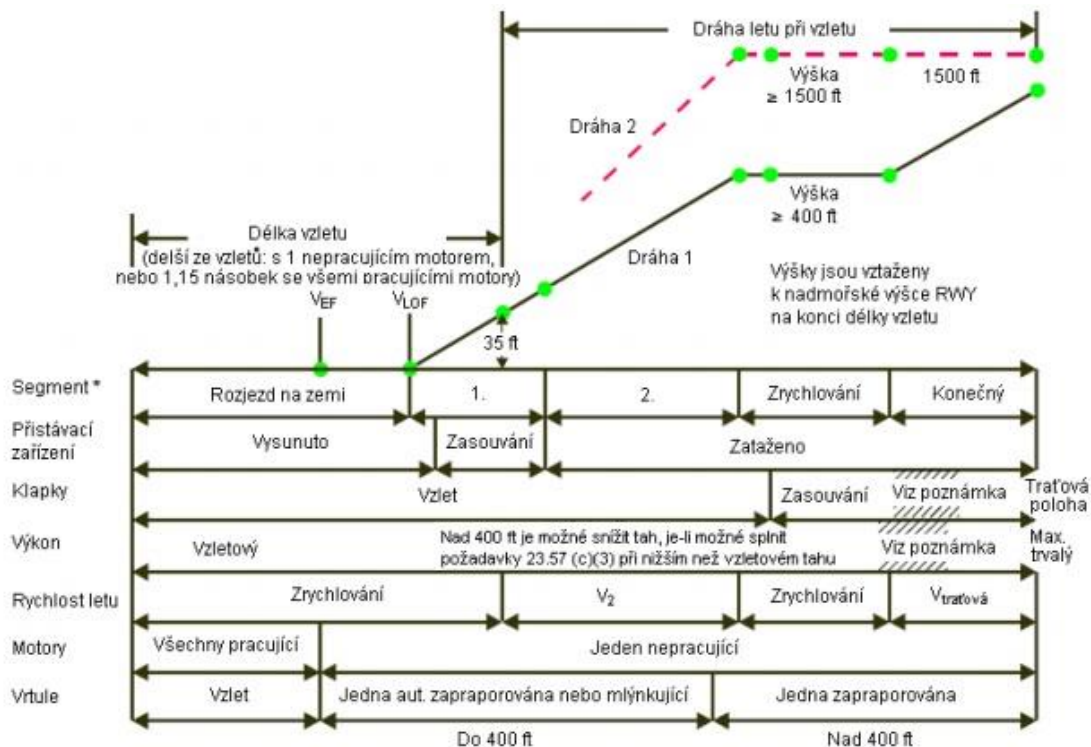
GPS určitě není vhodný nástroj pro určování výšky. Letové hladiny jsou založeny na principu stejného barometrického tlaku. Hodnoty získané barometrickým měřením a GPS se značně liší. Pokud by různá letadla používala k určení výšky různé prostředky, hrozilo by nebezpečí, že nebudou schopna přesně určit vzájemnou polohu, což by mohlo vést ke srážkám.

Na obrázku 3.7 je znázorněno, jak závisí tlaková výška na počasí. Vlevo teplota i tlak odpovídají hodnotám Mezinárodní standardní atmosféry ISA. Uprostřed odpovídá ISA pouze teplota, kdežto tlak je vyšší. QNH je aktuální tlak na letišti přepočítaný na hladinu moře, QNE znamená, že na hladině moře je uvažován tlak 1013 hPa, tento tlak pak určuje letovou hladinu. Vpravo je situace za zvýšené teploty.



Obrázek 3.7 Změna tlakové výšky v závislosti na počasí [46]

Dalším důvodem, proč je použití GPS pro stanovení výšky nevhodné je, že GPS používá pro stanovení pozice model Země. Nejběžnější model WGS84 (World Geodetic System 1984) se od geoidu liší v některých částech Země až o 100 m.



Obrázek 3.6 Dráha letu při vzletu [43]

### Délka přistání

Délka přistání je vzdálenost nutná pro sestup z výšky 15 m (50 ft) až do úplného zastavení stroje. [44]

#### 3.4.4.1 Využití GPS

Měření vzdálenosti pomocí GPS není ovlivněno rychlostí větru, tato úloha se tedy vlastně neliší od měření vzdálenosti na zemi. Pro využití GPS je nutné znát hraniční body. Například pro rozjezd na zemi je potřeba určit moment, kdy se letoun plně vznese, pro délku vzletu je to moment dosažení výšky 35 ft.

Použití GPS podporuje i skutečnost, že jsou zkoušené délky definovány jako horizontální vzdálenosti mezi hraničními body. Současné měření vzdálenosti pomocí nástrojů jako je DME (Distance measuring equipment) totiž využívá radiový signál ke změření přímé vzdálenosti vysílače a letadla. To znamená, že horizontální vzdálenost je třeba dopočítat za použití výšky, což do měření vnáší chybu výpočtu i chybu měření výšky.

#### 3.4.5 Stoupání

Před záznamem údajů ze série stoupání je nutné stabilizovat rychlost letu a výkon. Stoupání by mělo být zaznamenáváno po dobu 3 minut nebo minimálně o 914 m (3 000 ft), přičemž by měla být udržována víceméně konstantní rychlost letu.

Stoupání by mělo být provedeno pod úhlem 90° k větru a následně také v opačném kurzu, aby byly minimalizovány účinky stříhu větru.

## 4 Praktické měření

Měření má za cíl srovnat hodnoty získané pomocí GPS a Pitot-statického systému pro klouzavý let.

Letoun: WT9 Dynamics, rozpětí křídel 8,93 m, plocha křídel 10,31 m<sup>2</sup>, hmotnost 328 kg

Datum: 17.5.2019

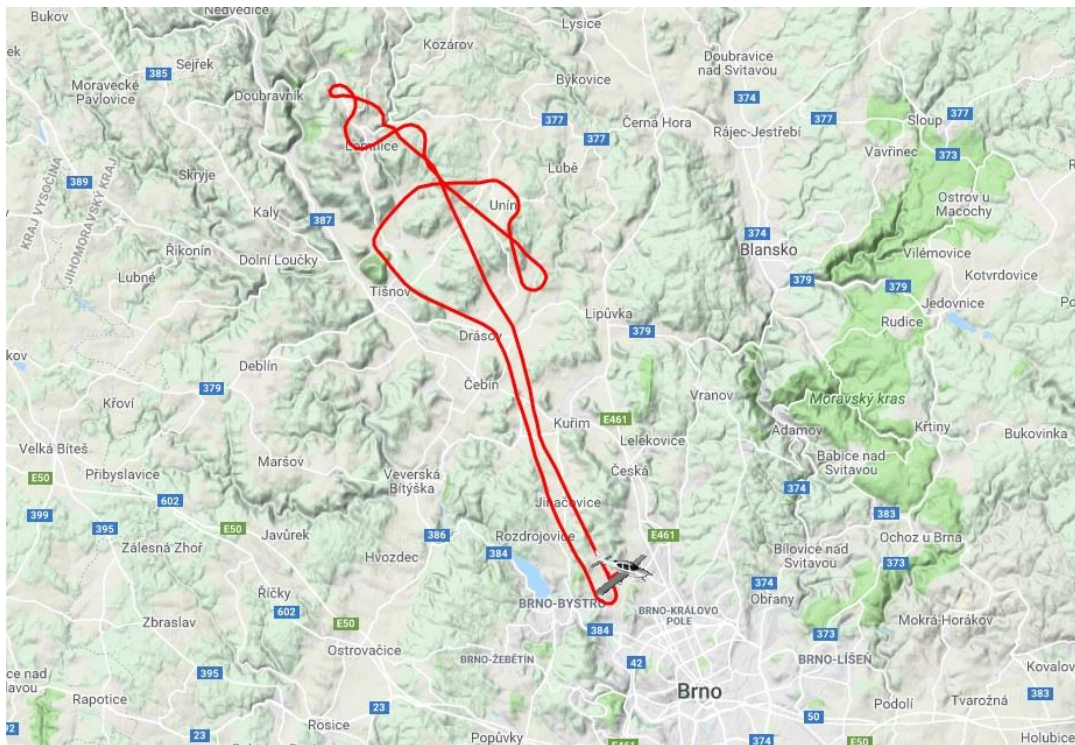
Čas startu: 8:16 UTC

Místo: Letiště Brno-Medlánky

Počasí: Polojasno

Teplota: 14 °C

Vítr: Jihovýchodní 0-4 m/s



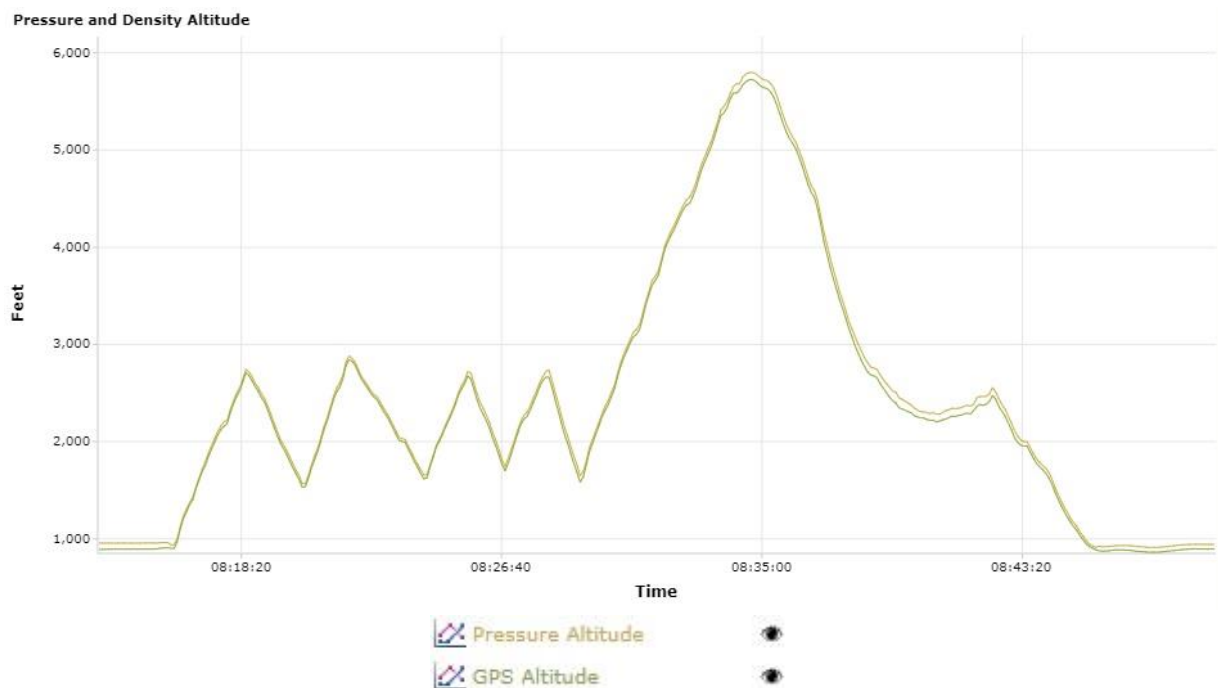
Obrázek 4.1 Záznam zkušebního letu na mapě

### 4.1 Popis metody

Charakteristikou klouzavého letu je jeho klouzavost nebo rychlost opadání. Při měření zkoušený letoun vystoupá na výšku  $H_1$ , ze které se spouští ustáleným klesavým letem určenou rychlostí na výšku  $H_2$ . Na obrázku 5.1 je vidět závislost výšky na čase ze zkušebního měření. Po startu následuje stoupání do výšky 2500 ft a klesavý let rychlostí 130 km/h. Tento postup



byl opakován ještě třikrát pro rychlosti 110 km/h, 150 km/h a 170 km/h. Měřeny byly hodnoty teploty, tlaku, tlakové výšky, výšky GPS, pravé vzdušné rychlosti a času.



Obrázek 4.2 Závislost výšky na čase

Měření se provádí v ranních hodinách, kdy je termická aktivita nízká. Průlet termickým proudem může výrazně ovlivnit výsledky zkoušky. Naproti tomu konstantní vítr nemá na výsledky žádný vliv.

## 4.2 Přístrojové vybavení

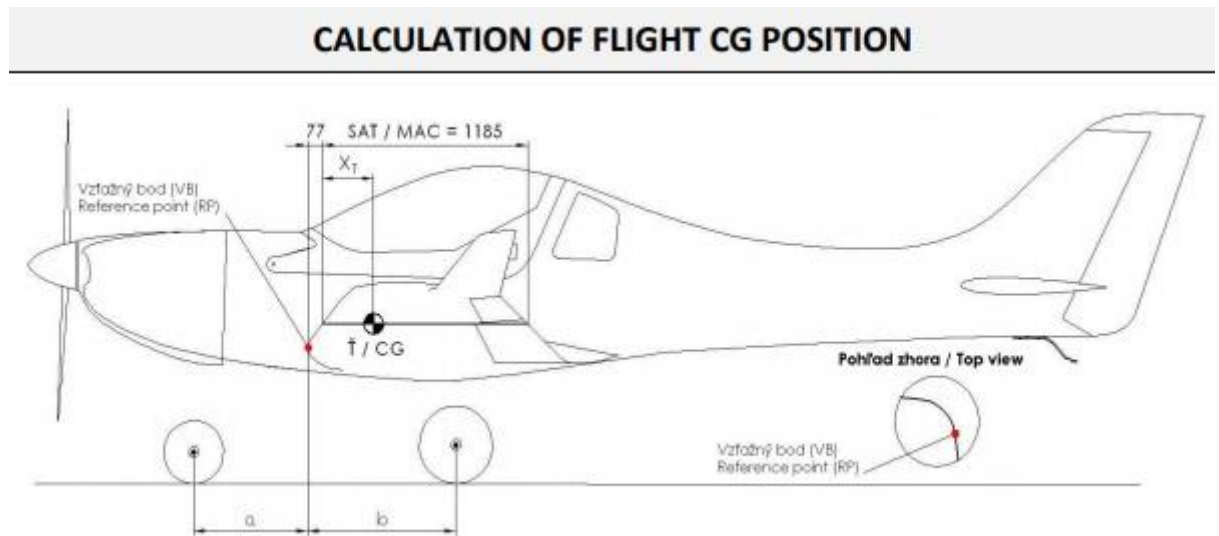
Pro měření byl použit Pitot-statický systém letounu WT9 Dynamics a GPS Garmin G3X.



Obrázek 4.3 Garmin G3X [48]

## 4.2.1 Výpočet těžiště

Poloha těžiště ovlivňuje rozložení sil na křídlech a ocasních plochách.



Obrázek 4.4 Výpočet těžiště [49]

Prázdný letoun ( $G_E$ )	328 kg	Prázdný moment ( $M_E$ )	80 774,4 kgmm
	Hmotnost	Vzdálenost od referenčního bodu	Moment
Posádka ( $G_C$ )	155 kg	720 mm	111 600 kgmm
Palivo ( $G_F$ )	70 kg	240 mm	16 800 kgmm
Náklad ( $G_B$ )	0 kg	1100 mm	0 kgmm
Výsledná hmotnost ( $G_T$ )	553 kg	Výsledný moment ( $M_T$ )	209 174,4 kgmm

Tabulka 4.1 Výpočet výsledné hmotnosti a momentu

$$x_T(\text{mm}) = \frac{M_T}{G_T} - 77 = 301,3 \text{ mm} \quad (4.1)$$

$$x_{CT}(\%MAC) = \frac{x_T}{MAC} 100 = \frac{301,3}{1185} 100 = 25,4 \%MAC \quad (4.2)$$

Povolená pozice těžiště je 20-30 %MAC. MAC (*Mean Aerodynamic Chord*) vyjadřuje polohu těžiště na křídle v procentech délky křídla.

Hodnoty byly rozděleny do dvou skupin na hodnoty získané měřením GPS a Pitot-statickým systémem.

Měření	Čas $\Delta t$ [s]	$V_{TAS}$ [ $ms^{-1}$ ]	$V_Z$ [ $ms^{-1}$ ]	Výška $\Delta H$ [m]	$\gamma$ [rad]	$C_D$ [-]	$C_L$ [-]
1	57	37,65	3,65	208,18	0,10	0,063281	0,649303
2	116	32,10	2,66	309,07	0,08	0,074479	0,89429
3	51	42,46	4,28	218,24	0,11	0,051696	0,510353
4	39	48,74	5,49	213,97	0,11	0,043814	0,386788

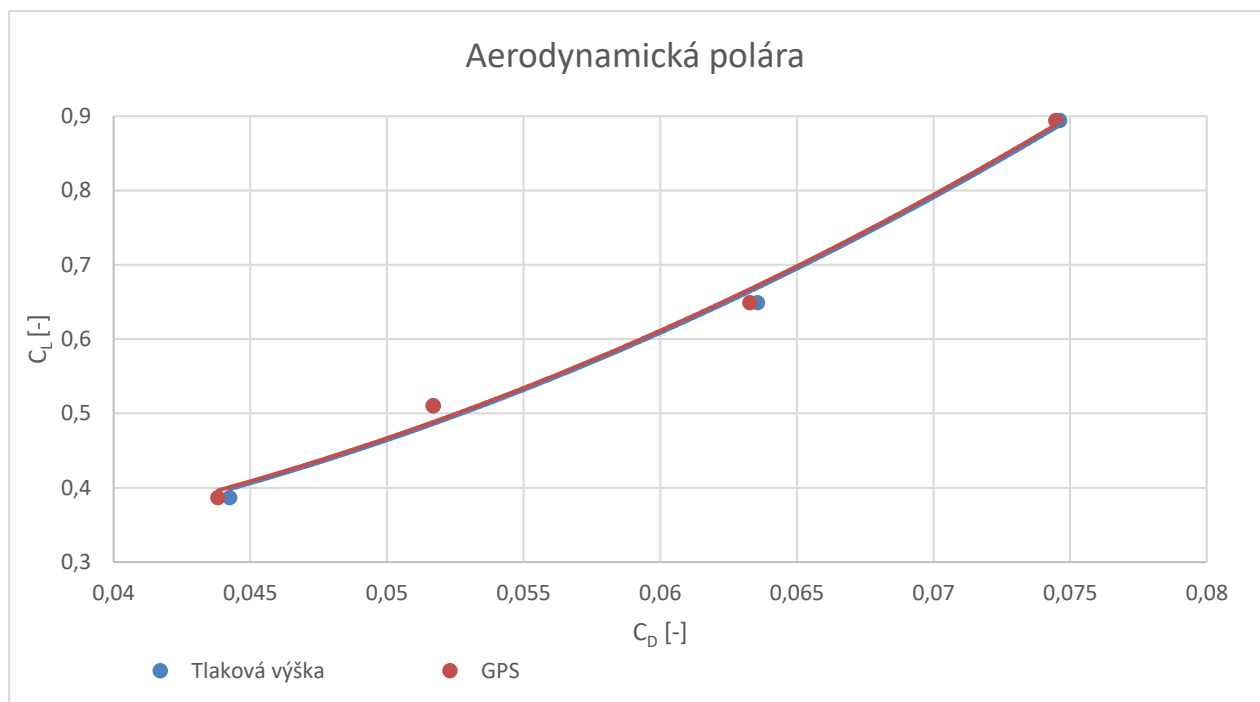
Tabulka 4.3 Hodnoty získané pomocí GPS

Měření	Čas $\Delta t$ [s]	$V_{TAS}$ [ $ms^{-1}$ ]	$V_Z$ [ $ms^{-1}$ ]	Výška $\Delta H$ [m]	$\gamma$ [rad]	$C_D$ [-]	$C_L$ [-]
1	57	37,65	3,67	209,10	0,10	0,063559	0,649293
2	116	32,10	2,67	309,68	0,08	0,074626	0,894278
3	51	42,46	4,28	218,24	0,10	0,051696	0,510353
4	39	48,74	5,54	216,11	0,11	0,044251	0,386738

Tabulka 4.4 Hodnoty získané pomocí Pitot-statického systému

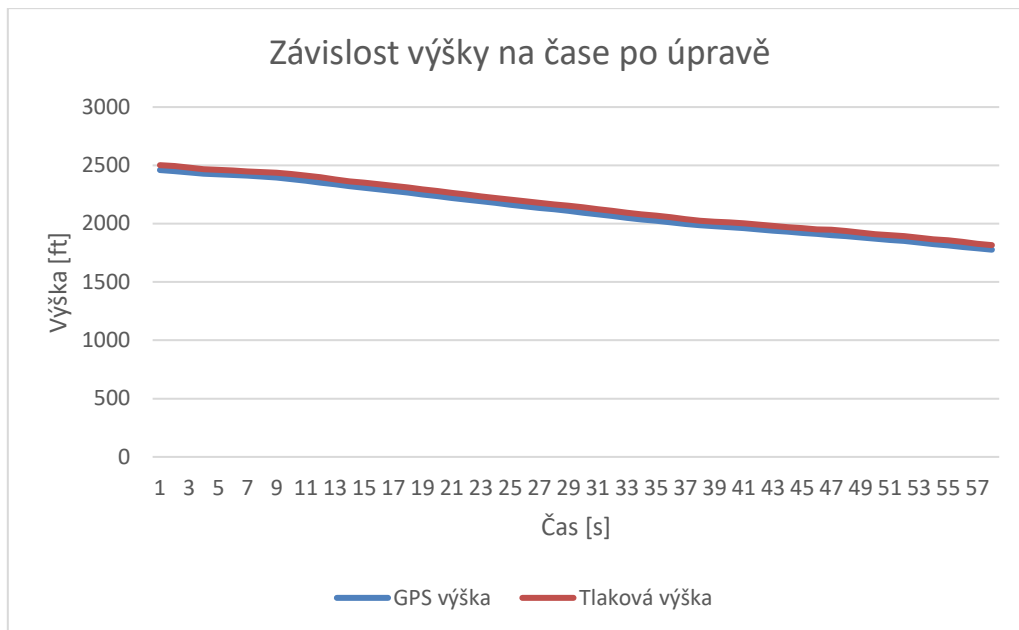
#### 4.4 Vykreslení poláry

Aerodynamická polára vyjadřuje závislost součinitele vztlaku na součiniteli odporu.



Obrázek 4.7 Aerodynamická polára





Obrázek 4.6 Závislost výšky na čase po úpravě

Klouzavost se vypočítá jako podíl součinitele vztlaku  $C_L$  ku součiniteli odporu  $C_D$ . Pro výpočet součinitelů platí:

$$C_L = \frac{2mg * \cos(\gamma)}{\rho * V_{TAS}^2 * S} \quad (4.3)$$

$$C_D = \frac{2mg * \sin(\gamma)}{\rho * V_{TAS}^2 * S} \quad (4.4)$$

kde  $m$  je aktuální hmotnost letounu (výpočet v této práci zanedbává úbytek paliva),  $\rho$  aktuální hustota prostředí,  $V_{TAS}$  je pravá vzdušná rychlost,  $S$  plocha křídla a pro úhel klouzání  $\gamma$  platí vztah:

$$\gamma = \arcsin\left(\frac{V_Z}{V_{TAS}}\right) \quad (4.5)$$

$V_Z$  je rychlost opadání. Vypočítá se jako podíl změny výšky a odpovídajícího času, tedy  $V_Z = \frac{\Delta H}{\Delta t}$ . Změna výšky a času se získává jako rozdíl mezi počátečními a koncovými hodnotami měřeného úseku.

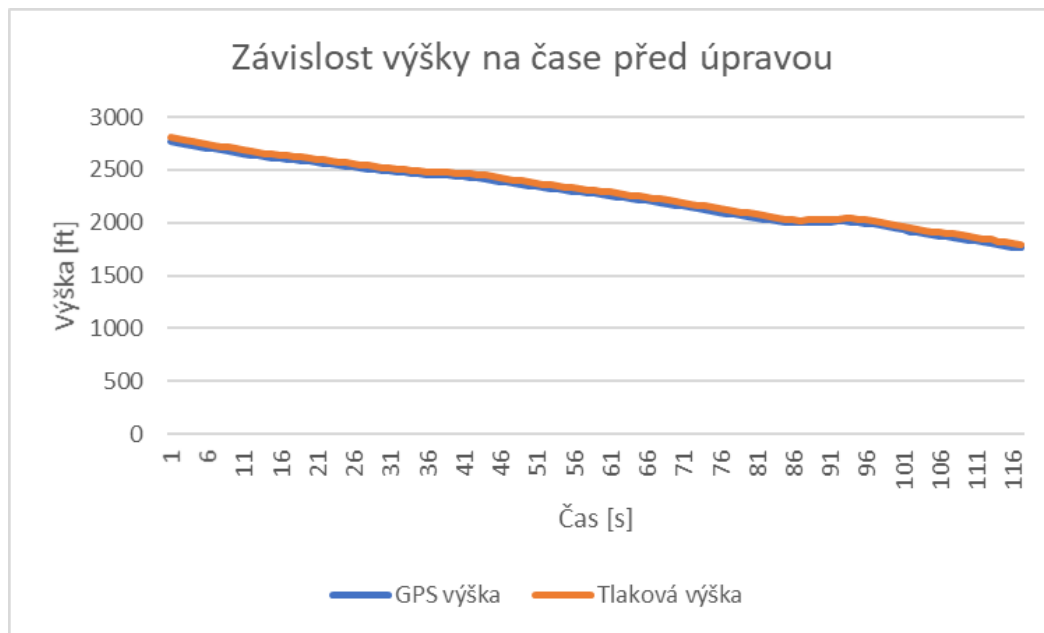
### 4.3 Zpracování dat

Pro porovnání dat získaných pomocí GPS a měření tlaku byly provedeny čtyři měření. Následující tabulka obsahuje data zaznamenaná za letu, která slouží k orientaci v záznamech přístrojů z letadla.

Měření	Teplota [°C]	Počáteční výška [ft]	Koncová výška [ft]	Rychlost [km/h]	Začátek měření (UTC)	Konec měření (UTC)
1	12	2500	1800	130	8:19:00	8:20:00
2	11	2800	1800	110	8:22:00	8:24:16
3	10	2500	1800	150	8:25:30	8:26:50
4	9	2500	1800	170	8:28:25	8:29:10

Tabulka 4.2 Hodnoty zaznamenané za letu

Po vyřídění dat se vykreslí závislosti výšky na čase, aby bylo možné vyjmout data, která nejsou s ostatními v linii. Z měření číslo 2 byla vyjmuta data kolem 90. sekundy měření, kdy letadlo patrně vletlo do stoupavého proudu vzduchu.



Obrázek 4.5 Závislost výšky na čase před úpravou

## 6 Závěr

Cílem práce bylo definovat možnost použití GPS při zkouškách za letu. Po prozkoumání certifikačních předpisů bylo zjištěno, že GPS by bylo možné použít pro tři oblasti měření: měření rychlosti, měření výšky a měření délky.

GPS ze své povahy není vhodný nástroj pro měření rychlostí při certifikaci letounů. I přes to, že již existuje uznaná metoda pro kalibraci vzdušné rychlosti, je velmi náchylná na chybu způsobenou větrem. Pro letoun je důležitá rychlost vůči okolnímu proudu vzduchu, kterou GPS určit neumí. V leteckém provozu má ale určitě své místo, měření traťové rychlosti zajímá například zákazníky dopravních společností, protože právě ta určuje dobu letu.

Měření potvrdilo předpoklad, že GPS není vhodný nástroj pro měření absolutní výšky pro potřeby letectví, protože mezi tlakovou výškou a výškou změřenou GPS byl rozdíl až 83 ft. Rozdíl v absolutní výšce je způsoben změnou tlaku v atmosféře. Naproti tomu měření relativní výšky se shodovala.

Pokud budeme považovat hodnoty získané z měření tlaku (uznaná certifikační metoda) za směrodatné, lze na základě výsledků měření říci, že GPS dosahuje pro měření relativní výšky dostatečné přesnosti.

Použití GPS pro měření vzdálenosti by mohlo celý proces certifikace letounů značně urychlit. Certifikované délky jsou definovány jako horizontální vzdálenosti. Úloha pro měření za letu se tedy od pozemní neliší.

GPS je primárně vojenský systém patřící Spojeným státům americkým, které si vyhrazují právo kdykoli znovu zavést umělou odchylku nebo zneprístupnit systém veřejnosti. Bez ohledu na vlastnosti systému na něj proto nelze naprosto spoléhat. GPS ovšem není jediný globální polohový družicový systém, v provozu jsou i další systémy, jako například ruský GLONASS nebo evropský systém Galileo.

## 5 Vyhodnocení výsledků

Měření klouzavého letu dopadlo pro GPS velmi příznivě. V tabulce 5.1 je vypočítán rozdíl mezi  $\Delta H$  naměřeným pomocí GPS a pomocí tlaku. V tabulce 5.2 je totéž pro rychlost opadání.

Rychlost [km/h]	110	130	150	170
$\Delta H$ GPS [m]	309,07	208,18	218,24	213,97
$\Delta H$ tlaková [m]	309,68	209,09	218,24	216,11
$\Delta H_{\text{tlak}} - \Delta H_{\text{GPS}}$ [m]	0,6096	0,9144	0	2,1336

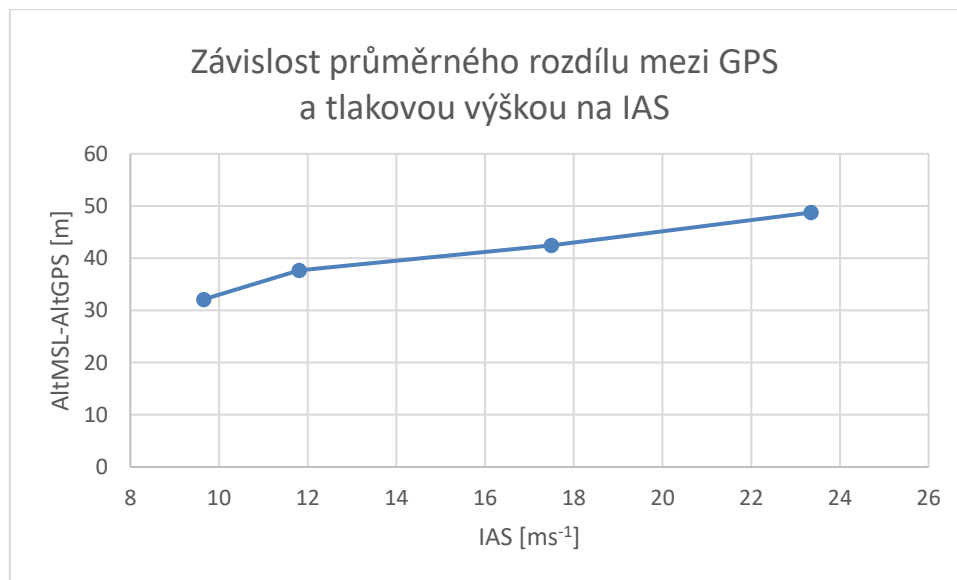
Tabulka 5.1 Rozdíl mezi výškou změřenou pomocí tlaku a pomocí GPS

Rychlost [km/h]	110	130	150	170
$V_Z$ GPS [m/s]	2,6644	3,652	4,279	5,486
$V_Z$ tlaková [m/s]	2,670	3,668	4,279	5,541
$V_{Z\text{tlak}} - V_{Z\text{GPS}}$ [m/s]	0,005	0,016	0	0,055

Tabulka 5.2 Rozdíl mezi rychlostí změřenou pomocí tlaku a pomocí GPS

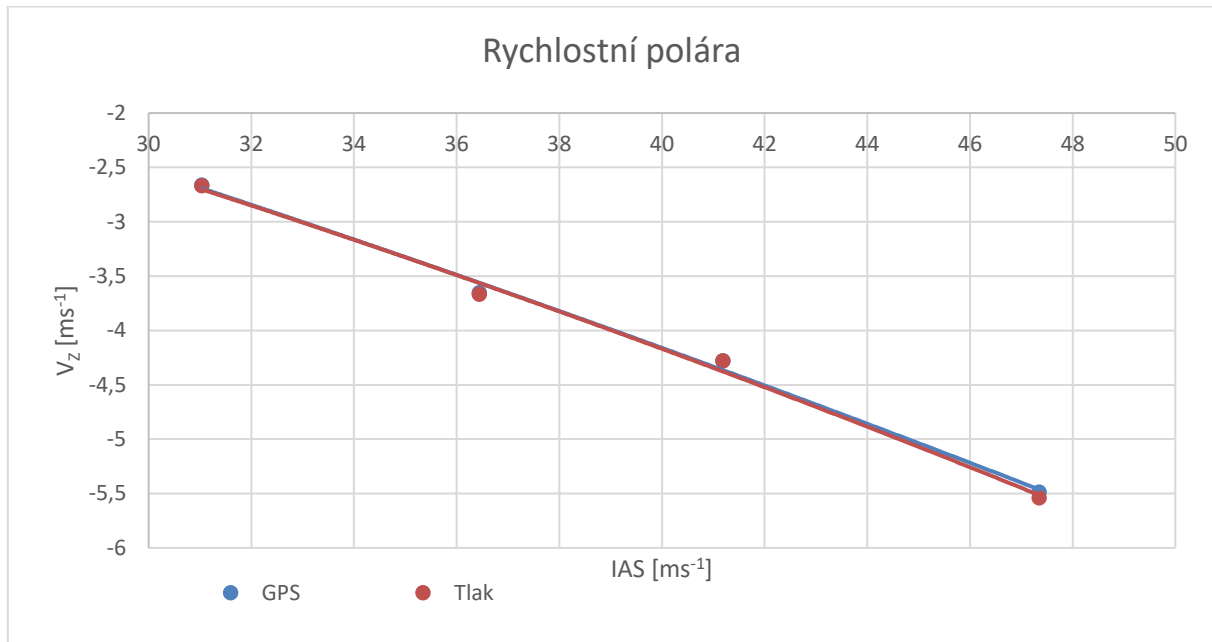
Relativní rozdíly mezi  $\Delta H$  získanými z měření oběma metodami nepřesáhly 1 %.

Ze závislosti průměrného rozdílu mezi výškou GPS a tlakovou výškou na indukované vzdušné rychlosti na obrázku 5.1 je zřejmé, že rozdíl se zvětšuje se stoupající rychlostí. To se ale jeví spíše jako problém s měřením tlaku. Vyšší tlaková výška totiž znamená nižší statický tlak, což odpovídá poklesu tlaku při zvýšení rychlosti proudění kolem letadla.



Obrázek 5.1 Závislost rozdílu mezi GPS a tlakovou výškou na indukované vzdušné rychlosti

Rychlostní polára vyjadřuje závislost rychlosti opadání na indikované vzdušné rychlosti. Vedeme-li ke grafu tečnu z počátku, získáme rychlost, při které je dosaženo nejlepší klouzavosti. Z grafu získaného měřením nebylo možné tuto rychlost určit.



Obrázek 4.8 Rychlostní polára

## Použité zdroje

- [1] RAPANT, Petr. *Družicové polohové systémy*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2002. 202 s.
- [2] RAPANT, Petr. *Družicové polohové systémy*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2002. 202 s.
- [3] Global positioning systém [online] 2017 [cit. 2019-03-19]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/policy/GPS.html>
- [4] NASA Space Science Data Coordinated Archive [online] 2019 [cit. 2019-03-21]. Dostupné z: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1997-035A>
- [5] ŠVÁBENSKÝ, Otakar. *Základy GPS a jeho praktické aplikace*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1996. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-0620-8. Skripta.
- [6] Encyklopedie fyziky [online] Jaroslav Reichl, Martin Všeticka. [cit. 2019-02-20]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/print/794-princip-cinnosti>
- [8] ČÁBELKA, Miroslav. *Úvod do GPS* [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <https://www.natur.cuni.cz/geografie/geoinformatika-kartografie/ke-stazeni/vyuka/gps/skriptum-uvod-do-gps/>
- [10] ŠVÁBENSKÝ, Otakar. *Základy GPS a jeho praktické aplikace*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1996. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-0620-8. Skripta.
- [11] ŠVÁBENSKÝ, Otakar. *Základy GPS a jeho praktické aplikace*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1996. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-0620-8. Skripta.
- [12] RAPANT, Petr. *Družicové polohové systémy*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2002. 202 s.
- [13] RAPANT, Petr. *Družicové polohové systémy*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2002. 202 s.
- [14] ŠVÁBENSKÝ, Otakar. *Základy GPS a jeho praktické aplikace*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1996. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-0620-8. Skripta
- [15] ŠVÁBENSKÝ, Otakar. *Základy GPS a jeho praktické aplikace*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1996. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-0620-8. Skripta

[18] Novatel. *GPS Position Accuracy Measures* [online]. 2003 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.novatel.com/assets/Documents/Bulletins/apn029.pdf>

[19] Novatel. *GPS Position Accuracy Measures* [online]. 2003 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.novatel.com/assets/Documents/Bulletins/apn029.pdf>

[22] Ing. MIRONOVOVA Martina, Ing. HAVLIŠ, Hynek. *Calculation of GDOP Coefficient* [online]. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://stc.fs.cvut.cz/history/2011/sbornik/papers/pdf/1100016-1.pdf>

[23] Ing. MIRONOVOVA Martina, Ing. HAVLIŠ, Hynek. *Calculation of GDOP Coefficient* [online]. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://stc.fs.cvut.cz/history/2011/sbornik/papers/pdf/1100016-1.pdf>

[24] Geodetická observatoř Pecný. *Testovací základna pro GPS* [online]. 2013 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://oko.pecny.cz/pecny/zgpspol.html#schema>

[28] Geodetická observatoř Pecný. *Testovací základna pro GPS* [online]. 2013 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://oko.pecny.cz/pecny/zgpspol.html#schema>

[31] VOSECKÝ, Slavomír. *Radionavigace (062 00)*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL 1. ISBN 80-7204-448-6. Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:4682e8e0-6aec-11e7-aab4-005056827e52>

[32] *Učebnice pilota 2016: pro žáky a piloty všech druhů letounů a sportovních létajících zařízení, provozujících létání jako svou zájmovou činnost*. Cheb: Svět křídel, 2016. ISBN 978-80-87567-89-0.

[33] DANĚK, Milan. *Zkoušení letadel za letu*. Brno: Vojenská akademie Antonína Zápotockého, 1962.

[34] DANĚK, Milan. *Zkoušení letadel za letu*. Brno: Vojenská akademie Antonína Zápotockého, 1962.

[36] Evropská agentur pro bezpečnost letectví. *Certifikační specifikace pro letouny kategorie normální, cvičná, akrobatické a pro sběrnou dopravu CS-23* [online]. 2010 [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <http://www.caa.cz/file/6289/>

[38] Evropská agentur pro bezpečnost letectví. *Certifikační specifikace pro letouny kategorie normální, cvičná, akrobatické a pro sběrnou dopravu CS-23* [online]. 2010 [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <http://www.caa.cz/file/6289/>

[39] Evropská agentur pro bezpečnost letectví. *Certifikační specifikace pro letouny kategorie normální, cvičná, akrobatické a pro sběrnou dopravu CS-23* [online]. 2010 [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <http://www.caa.cz/file/6289/>

[44] Evropská agentur pro bezpečnost letectví. *Certifikační specifikace pro letouny kategorie normální, cvičná, akrobatické a pro sběrnou dopravu CS-23* [online]. 2010 [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <http://www.caa.cz/file/6289/>

[45] Evropská agentur pro bezpečnost letectví. *Certifikační specifikace pro letouny kategorie normální, cvičná, akrobatické a pro sběrnou dopravu CS-23* [online]. 2010 [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <http://www.caa.cz/file/6289/>

## Zdroje obrázků

[7] Obrázek z webové stránky. [online]. [cit. 2019-02-20] Dostupné z: <https://www.gps.gov/systems/gps/space/>

[9] Obrázek z webové stránky. [online]. [cit. 2019-02-20] Dostupné z: [https://www.aldebaran.cz/bulletin/2005\\_02\\_gps.php](https://www.aldebaran.cz/bulletin/2005_02_gps.php)

[16] Obrázek z webové stránky. [online]. [cit. 2019-02-25] Dostupné z: <https://www.novatel.com/assets/Documents/Bulletins/apn029.pdf>

[17] Obrázek z webové stránky. [online]. [cit. 2019-03-05] Dostupné z: <http://blog.oplopanax.ca/2012/11/calculating-gps-accuracy/>

[20] Obrázek z webové stránky. [online]. [cit. 2019-04-20] Dostupné z: <https://www.uavnavigation.com/support/kb/general/general-system-info/global-navigation-satellite-system-gnss-errors>

[21] Obrázek z webové stránky. [online]. [cit. 2019-02-20] Dostupné z: <https://stc.fs.cvut.cz/history/2011/sbornik/papers/pdf/1100016-1.pdf>

[25] Obrázek z webové stránky. [online]. [cit. 2019-05-20] Dostupné z: <http://oko.pecny.cz/pecny/zgpspol.html#schema>

[26] Obrázek z webové stránky. [online]. [cit. 2019-05-20] Dostupné z: <http://oko.pecny.cz/pecny/zgpspol.html#schema>

[27] Obrázek z webové stránky. [online]. [cit. 2019-05-20] Dostupné z: <http://oko.pecny.cz/pecny/zgpspol.html#schema>

[29] Obrázek z webové stránky. [online]. [cit. 2019-05-20] Dostupné z: <http://oko.pecny.cz/pecny/zgpspol.html#schema>

[30] Obrázek z webové stránky. [online]. [cit. 2019-05-20] Dostupné z: <http://www.airnav.eu/index.php?stranka=gnss#sbas>

[35] Obrázek z webové stránky. [online]. [cit. 2019-05-20] Dostupné z: <http://www.caa.cz/file/6289/>



## Seznam tabulek

Tabulka 3.2.1 Spolehlivost měření 2D [18] .....	18
Tabulka 3.2.2 Spolehlivost měření 3D [19] .....	18
Tabulka 3.2.3 Činitele DOP [23] .....	21
Tabulka 4.1 Výpočet výsledné hmotnosti a momentu .....	39
Tabulka 4.2 Hodnoty zaznamenané za letu.....	40
Tabulka 4.3 Hodnoty získané pomocí GPS .....	42
Tabulka 4.4 Hodnoty získané pomocí Pitot-statického systému.....	42
Tabulka 5.1 Rozdíl mezi výškou změřenou pomocí tlaku a pomocí GPS.....	44
Tabulka 5.2 Rozdíl mezi rychlostí změřenou pomocí tlaku a pomocí GPS .....	44

## Seznam zkratk

AAIM	Airborne Autonomous Integrity Monitoring
A-BAS	Airbone-Based Augmentation System
AFB	Air Force Base
C/A	Clear/Access
CAS	Calibrated Airspeed
CEP	Circular Error Probable
DME	Distance Measuring Equipment
DOP	Dilution Of Precision
DRMS	Distance Root Mean Squared
FOC	Full Operational Capability
G-BAS	Ground-Based Augmentation System
GPS	Global Positioning System
GPST	Global Positioning System Time
HDOP	Horizontal Dilution Of Precision
ISA	International Standard Atmosphere
MAC	Mean Aerodynamic Chord
MRSE	Mean RadialSpherical Error
OTF	On The Fly
P	Protected
PDOP	Position Dilution Of Precision
PRN	Pseudo Random Noise
RAIM	Receiver Autonomous Integrity Monitoring
SA	Selective Availability
S-BAS	Satellite-Based Augmentation System
SEP	Spherical Error Probable
TDOP	Time Dilution Of Precision
TSPI	Time Space Position Information
VDOP	Vertical Dilution Of Precision
WGS84	World Geodetic System 1984

## Seznam obrázků

Obrázek 2.1 Dráhy družic GPS [7] .....	13
Obrázek 2.2 Řídící segment GPS [9] .....	13
Obrázek 2.3.3 Vztah mezi správností a přesností [16].....	17
Obrázek 2.4 Rozptyl [17] .....	17
Obrázek 2.5 Vliv Geometrie na přesnost [20].....	19
Obrázek 2.6 Směrový vektor [21] .....	20
Obrázek 2.7 Pilíře vnitřní základny [25] .....	22
Obrázek 2.8 Nucená centrace na jednom z pilířů vnitřní základny [26].....	22
Obrázek 2.9 Umístění pilířů testovací základny GPS [27] .....	23
Obrázek 2.10 Bod vnější testovací základny GPS [29] .....	23
Obrázek 2.11 Princip S-BAS [30].....	24
Obrázek 3.1 Vlečná bomba a kužel [35] .....	28
Obrázek 3.2 Graf závislosti chyby vzdušné rychlosti na vzdušné rychlosti a délce zkušebního úseku [37].....	29
Obrázek 3.3 Délka vzletu [40] .....	32
Obrázek 3.4 Délka vzletu 115 % délky se všemi pracujícími motory [41] .....	32
Obrázek 3.5 Délka rozjezdu, Předpolí [42].....	33
Obrázek 3.6 Dráha letu při vzletu [43].....	34
Obrázek 3.7 Změna tlakové výšky v závislosti na počasí [46] .....	35
Obrázek 3.8 Rozdíly mezi elipsoidem a geoidem [47] .....	36
Obrázek 4.1 Záznam zkušebního letu na mapě.....	37
Obrázek 4.2 Závislost výšky na čase .....	38
Obrázek 4.3 Garmin G3X [48].....	38
Obrázek 4.4 Výpočet těžiště [49] .....	39
Obrázek 4.5 Závislost výšky na čase před úpravou .....	40
Obrázek 4.6 Závislost výšky na čase po úpravě.....	41
Obrázek 4.7 Aerodynamická polára.....	42
Obrázek 4.8 Rychlostní polára .....	43
Obrázek 5.1 Závislost rozdílu mezi GPS a tlakovou výškou na indukované vzdušné rychlosti .....	44

[37] Obrázek z webové stránky. [online]. [cit. 2019-05-20] Dostupné z: <http://www.caa.cz/file/6289/>

[40] Obrázek z webové stránky. [online]. [cit. 2019-05-20] Dostupné z: <http://www.caa.cz/file/6289/>

[41] Obrázek z webové stránky. [online]. [cit. 2019-05-20] Dostupné z: <http://www.caa.cz/file/6289/>

[42] Obrázek z webové stránky. [online]. [cit. 2019-05-20] Dostupné z: <http://www.caa.cz/file/6289/>

[43] Obrázek z webové stránky. [online]. [cit. 2019-05-20] Dostupné z: <http://www.caa.cz/file/6289/>

[46] Obrázek z webové stránky. [online]. [cit. 2019-05-04] Dostupné z: <https://xcmag.com/news/gps-versus-barometric-altitude-the-definitive-answer>

[47] Obrázek z webové stránky. [online]. [cit. 2019-05-20] Dostupné z: <https://gis.stackexchange.com/questions/80533/which-of-egm96-geoid-or-wgs84-ellipsoid-fits-the-earth-better>

[48] Obrázek z webové stránky. [online]. [cit. 2019-05-18] Dostupné z: <https://buy.garmin.com/en-US/US/p/166058>

[49] Obrázek z webové stránky. [online]. [cit. 2019-05-20] Dostupné z: <http://www.grenlandflyklubb.no/cmsfile.php?Id=253>

## Seznam symbolů

$T$	[s]	perioda
$f_0$	[Hz]	základní frekvence
$f$	[Hz]	frekvence
$\varphi$	[°]	fáze
$\lambda$	[m]	vlnová délka
$t$	[s]	čas
$t_0$	[s]	počáteční čas
$\tau$	[s]	doba šíření signálu
$D_0$	[m]	pseudovzdálenost
$c$	[ms <sup>-1</sup> ]	rychlost světla
$\sigma$	[m]	směrodatná odchylka
$V_{s1}$	[ms <sup>-1</sup> ]	pádová rychlost
$V_{LOF}$	[ms <sup>-1</sup> ]	rychlost nazdvihnutí
$V_2$	[ms <sup>-1</sup> ]	bezpečná rychlost stoupání
$V_{EF}$	[ms <sup>-1</sup> ]	rychlost s vysazenou kritickou jednotkou
$V_1$	[ms <sup>-1</sup> ]	rychlost rozhodnutí
$x,y,z$	[m]	poloha přijímače
$x_i,y_i,z_i$	[m]	poloha družice