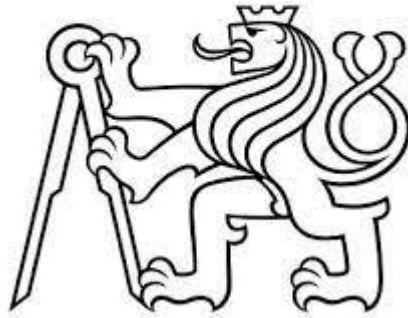


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta dopravní

Ústav letecké dopravy



Bakalářská práce

Předpověď tlaku QNH

Marian Flekač

Vedoucí práce: Mgr. Iveta Kameníková

Studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojích

Obor: Profesionální pilot

2021



K621 **Ústav letecké dopravy**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Marian Flekač

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 – PIL – Profesionální pilot

Název tématu (česky): **Předpověď tlaku QNH**

Název tématu (anglicky): QNH Pressure Forecast

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je popsat možnosti předpovědi tlaku vzduchu se zaměřením na tlak QNH
- Definujte druhy tlaků a jejich využití v letectví
- Popište možnosti předpovědi tlaku vzduchu se zaměřením na tlak QNH
- Porovnejte vypočtená data z modelu Aladin s reálnými hodnotami QNH
- Statisticky vyhodnoťte úspěšnost modelu Aladin
- Na základě dosažených výsledků diskutujte možnosti zpřesnění předpovědi tlaku QNH



- 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: Met Office: Forecaster's Reference Book
Dvořák, P: Letecká Meteorologie
Oxford aviation academy: Meteorology

Vedoucí bakalářské práce: **Mgr. Iveta Kameníková**

Datum zadání bakalářské práce: **9. října 2020**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **9. srpna 2021**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

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



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

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Marian Flekač
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 9. října 2020

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucí mé práce Mgr. Ivetě Kameníkové za odbornou pomoc, dobré rady a schopnost udělat si čas, kdykoliv byla potřeba. Dále patří mé poděkování Ing. Blance Chalupníkové, Ph.D., která semnou celý rok ochotně komunikovala, zprostředkovala důležité schůzky a se kterou jsme za pomoci Ing. Vašíčka vymysleli náplň této práce. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat RNDr. Radmile Brožkové, CSc. a Ing. Petrovi Černému, kteří mi věnovali čas při sběru dat a kteří poskytli informace přímo z praxe, dále pak Mgr. Pavlovi Provinskému, PhD. za pomoc se statistikou. Závěrem děkuji celé své rodině a blízkým za podporu, zvláště bratrovi Filipovi za pomoc při třídění nemalého množství dat.

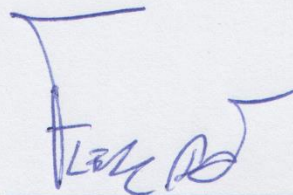
Prohlášení

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

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

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

Ve Strání dne 5.8. 2021



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

PŘEDPOVĚĚ TLAKU QNH

bakalářská práce

srpen 2021

Marian Flekač

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá tlakem vzduchu a jeho předpovědí. V teoretické části jsou popsány obecné principy spojené s tlakem, praktická část rozebírá práci s tlakem v letectví. Součástí praktické části je také vyhodnocení předpovědi modelu ALADIN, což je hlavním cílem celé práce.

Klíčová slova: Tlak vzduchu, měření, tlakové útvary, předpověď, model ALADIN

Abstract

This bachelor thesis deals with air pressure and its prediction. The theoretical part describes the general principles connected with pressure, the practical part also includes evaluation of the air pressure forecast produced by model ALADIN, which is the main goal of this work.

Keywords: Air pressure, measurement, pressure objects, forecast, model ALADIN

Obsah

KAPITOLA I – SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	8
KAPITOLA II – ÚVOD	9
KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST	11
1 SEZNÁMENÍ S TLAKEM VZDUCHU	11
1.1 JEDNOTKY	11
1.1.1 EVANGELISTA TORRICELLI.....	12
1.2 MĚŘENÍ.....	15
1.2.1 BAROGRAF	18
1.2.2 REKORDY MĚŘENÍ	19
2 TLAK A ATMOSFÉRA.....	21
2.1 MEZINÁRODNÍ STANDARDNÍ ATMOSFÉRA.....	21
2.2 TLAKOVÉ ÚTVARY V ATMOSFÉŘE	24
2.2.1 UZAVŘENÉ TLAKOVÉ ÚTVARY	25
2.2.2 OSTATNÍ TLAKOVÉ ÚTVARY	29
KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST	31
3 TLAK VZDUCHU A LETECTVÍ	31
3.1 DRUHY TLAKU VZDUCHU	31
3.2 PRÁCE S TLAKEM V LETADLE	33
3.3 METAR A ATIS.....	34
4 PŘEDPOVĚĎ TLAKU VZDUCHU	36
4.1 PŘEDPOVĚĎ MODELU ALADIN	38
4.2 VÝSLEDKY	40
4.2.1 LKPR	42
4.2.2 LKTb.....	45
4.2.3 LKMT	48
4.2.4 LKKV	51
4.2.5 ZHODNOCENÍ.....	54
KAPITOLA V – ZÁVĚR.....	55
LITERATURA.....	57
SEZNAM OBRÁZKŮ	60
SEZNAM TABULEK	62

KAPITOLA I

Seznam použitých zkratek

ALADIN	Aire Limitée Adaptation Dynamique Development International
ATIS	Automatic Terminal Information Service
ČR	Česká republika
ICAO	International Civil Aviation Organisation
IFR	Pravidla pro let podle přístrojů
ISA	International Standard Atmosphere
METAR	Meteorological Terminal Air Report
MSA	Mezinárodní Standardní Atmosféra
REG	Regionální
SI	Mezinárodní systém jednotek
SPECI	Special report of meteorological conditions
VRF	Pravidla pro let za viditelnosti

KAPITOLA II

Úvod

Tlak vzduchu je důležitým parametrem v oblasti celé meteorologie. Pomocí jeho změn lze do jisté míry předpovídat počasí. Při četbě této práce se čtenář seznámí s obecnými zákonitostmi tlaku jako takového, jsou zde popsány základní tlakové útvary, vztah tlaku a letectví nebo je nastíněn princip předpovídání modelu ALADIN. Právě statistické porovnání předpovědi na základě modelu s reálnými naměřenými hodnotami pro čtyři letiště v ČR je hlavním cílem této práce. Téma bylo vymyšleno během téměř ročního komunikování a setkávání se s pracovníky ČHMÚ, kteří poskytli data pro potřeby této práce stejně tak, jako cenné rady a informace. Práce se skládá z teoretické a praktické části.

V první kapitole teoretické části jsou popsány základní principy tlaku vzduchu a jednotky. Je zde také nahlédnutí do historie a zmínka o událostech, které vedly k definování tlaku vzduchu nebo třeba vakua. Podstatná část této kapitoly se věnuje měření tlaku vzduchu. Jsou zde popsány nejrůznější tlakoměrné přístroje, barograf a součástí jsou také rekordní hodnoty měření tlaku vzduchu jak světové, tak domácí.

Druhá kapitola je zaměřena na tlak vzduchu ve spojitosti s atmosférou. Nejprve je věnován prostor mezinárodní standardní atmosféře a v další části jsou rozebrány základní tlakové útvary. Jedná o tlakové útvary uzavřené (anticyklóna, cyklóna) a tlakové útvary otevřené (brázda nízkého tlaku vzduchu, tlakové sedlo atd.).

KAPITOLA II – ÚVOD

Praktická část je takéž složena ze dvou kapitol. První z nich s názvem „Tlak vzduchu v letectví“ definuje různé druhy tlaku vzduchu a následně vysvětluje jejich užívání v běžné letecké praxi. Jedná se především o standardní tlak a tlak QNH a s nimi spojené pojmy převodní výška a převodní hladina.

Konečně druhá kapitola praktické části popisuje průběh a přináší výsledky porovnání modelu s reálnými naměřenými hodnotami pro každé letiště. Jedná se o letiště v Praze, Brně, Ostravě a Karlových Varech. Měření je provedeno v rozsahu šesti měsíců, a byť autor nechce předbít, výsledky jsou velmi dobré.

KAPITOLA III

Teoretická část

1 Seznámení s tlakem vzduchu

Úvodní část této kapitoly se věnuje základním principům a zákonitostem souvisejících s tlakem vzduchu obecně. Tlak je fyzikální veličina, která vyjadřuje poměr velikosti síly F působící na rovinnou plochu rovnoměrně a spojitě rozloženou po této ploše a obsahu S této plochy. Jinými slovy lze říci, že síla, působící na jednotku plochy, je podle definice tlak. Se značením je to jednoduché, nejčastěji se označuje písmenem p (z latinského *pressura*), nicméně jednotek je už o poznání víc. [1]

1.1 Jednotky

V soustavě SI je základní jednotkou tlaku 1 Pa (pascal). Z definice popsané v předchozím odstavci vyplývá, že 1 Pa je tlak, který vyvolá síla 1 N působící kolmo na plochu o obsahu 1 m². V letectví se nejčastěji setkáváme s vyjádřením ve stovkách pascalů – hPa. V ČR patří dle vyhlášky č. 264/2000 mezi dočasně povolené zvláštní názvy násobků a dílů soustavy SI *bar*, přičemž 1 bar = 100 000 Pa (tedy 1 mbar = 1 hPa).

Další, dnes už prakticky zastaralý pojem ve vztahu k tlaku, je *Atmosféra*. Takto se označovaly 2 jednotky nepatřící do soustavy SI – technická a fyzikální. Technická atmosféra se značila *at*

KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

a jak už z názvu vypovídá, používala se v technických oborech, např. ve strojírenství. Odpovídá hydrostatickému tlaku 10 m vodního sloupce a má přesně definovaný převodní vztah na pascaly.¹ Fyzikální atmosféra (též absolutní atmosféra) s označením *atm* je pro lidi angažované v letecké meteorologii poněkud lépe představitelná. Je definována jako tzv. normální tlak vzduchu, který se rovná tlaku vzduchu na hladině moře při podmínkách ISA a má také přesně definovaný převod na pascaly, nicméně mezinárodní standardní atmosféra je detailněji rozebrána v následujících kapitolách. [2]

Anglosaský zástupce mezi jednotkami tlaku je *PSI* a zjednodušeně se jedná o libru síly na čtverečný palec², proto se můžeme setkat také s označením *lbf/in²*. Pro kompletní souhrn je potřeba zmínit i *kilopond na čtverečný metr* (*kp/m²*), což je tlak působící tělesem o hmotnosti 1 kg v místě při působícím tíhovém zrychlení $9,80665 \text{ m/s}^2$ – tedy při průměrném tíhovém zrychlení na zemském povrchu. [3] *Tab. 1* popisuje vztahy mezi zmíněnými jednotkami:

Tabulka 1: Převodní tabulka jednotek tlaku [3]

Jednotky tlaku	pascal (Pa)	bar (bar)	kilopond na čtv. metr (kp/m ²)	technická atmosféra (at)	fyzikální atmosféra (atm)	torr = mmHg (Torr)	libra na čtv. palec (psi)
1 Pa	≡ 1 Pa	≡ 10 ⁻⁵ bar	≈ 0,1019716 kp/m ²	≈ 10,19716×10 ⁻⁶ at	≈ 9,869233×10 ⁻⁶ atm	≈ 7,500616×10 ⁻³ Torr	≈ 1,450377×10 ⁻⁴ psi
1 bar	≡ 10 ⁵ Pa	≡ 1 bar	≈ 10197,16213 kp/m ²	≈ 1,019716 at	≈ 0,9869233 atm	≈ 750,0616 Torr	≈ 14,50377 psi
1 kp/m ²	≈ 9,80665 Pa	≈ 98,0665×10 ⁻⁶ bar	≡ 1 kp/m ²	≡ 10 ⁻⁴ at	≈ 0,9678411×10 ⁻⁴ atm	≈ 0,0735559 Torr	≈ 0,001422334 psi
1 at	≡ 98066,5 Pa	≡ 0,980665 bar	≡ 10000 kp/m ²	≡ 1 at	≈ 0,9678411 atm	≈ 735,559 Torr	≈ 14,22334 psi
1 atm	≡ 101325 Pa	≡ 1,01325 bar	≈ 10332,27 kp/m ²	≈ 1,033227 at	≡ 1 atm	= 760 Torr	≈ 14,696 psi
1 Torr	≈ 133,322 Pa	≈ 1,33322×10 ⁻³ bar	≈ 13,59510 kp/m ²	≈ 1,359510×10 ⁻³ at	≈ 1,315789×10 ⁻³ atm	≡ 1 mm Hg	≈ 19,337×10 ⁻³ psi
1 psi	≈ 6894,757293 Pa	≈ 68,94757293×10 ⁻³ bar	≈ 703,0695796 kp/m ²	≈ 70,30695796×10 ⁻³ at	≈ 68,046×10 ⁻³ atm	≈ 51,7149 Torr	≡ 1 lbf/in ²

Jednotka *Torr* byla vynechána záměrně, jelikož je podrobněji rozebrána v textu níže.

1.1.1 Evangelista Torricelli

Tento italský fyzik žil v letech 1608–1647, vyrostl jako sirotek, vychován svým strýcem učeným mnichem a byl to nejnadanější žák Galilea Galileiho, po kterém později převzal úřad dvorního matematika na dvoře velkovévody toskánského. Zkoumal mimo jiné účinky zemské tíže na kapalinu. Na *Obr. 1* lze vidět Torricelliho podobu.



Obrázek 1: Evangelista Torricelli [3]

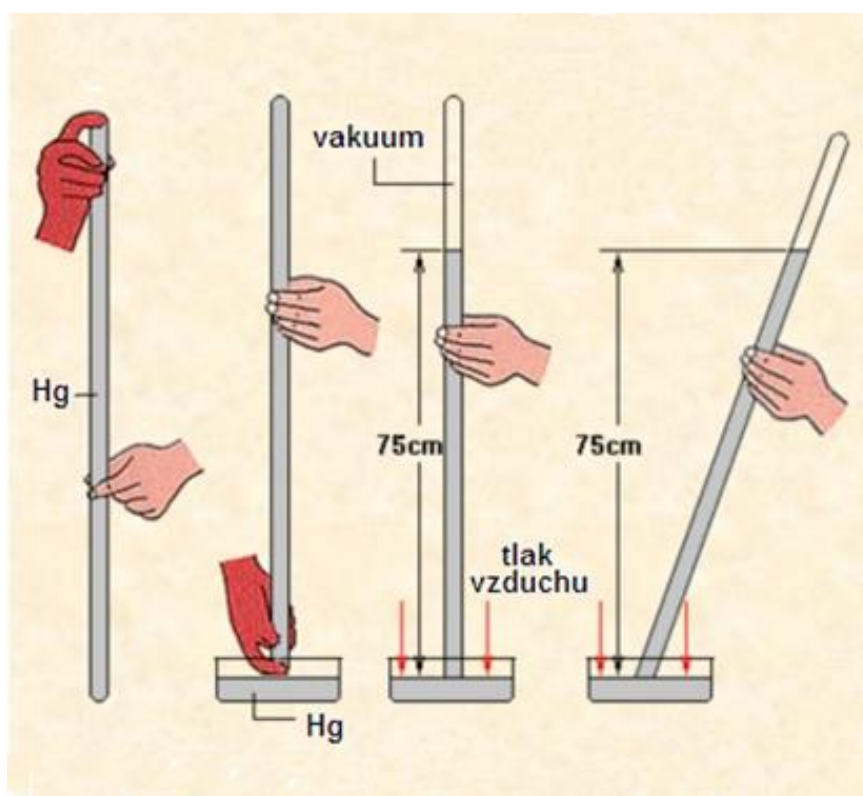
¹ 1 at = 9,806 65 x 10⁴ Pa

² angl. *pound per square inch*

KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

V Torricelliho době byla obecně uznávána Aristotelova myšlenka „*horror vacui*“, což v doslovném překladu znamená *děs před prázdnotou*. Aristoteles vysvětloval jevy jako např. když při pumpování ve studnách nebo násoskách vystupuje voda tím, že pod pístem nastává prostor prázdný, ale příroda takto prázdný prostor nesnese, a proto do toho místa vstupuje voda. Prostor je tedy nepřetržitě vyplněn hmotou a není vůbec možné, aby v přírodě nějaký prázdný prostor existoval. Vyplývá to z jeho filosofie, podle které je hmota spojitá a neskládá se z nejmenších od sebe oddělených dílků, jak tvrdí atomisté.

Galileo Galilei nejprve přijímal Aristotelovu tezi, nicméně až do roku 1640, kdy se měla zřídit pro toskánského velkovévodu pumpa, která měla čerpat vodu na terasu. Problém byl v tom, že voda vystoupala pouze do výšky 18 loket (cca 10 metrů). Torricelli byl s touto záležitostí obeznámen a považoval za zajímavé vyzkoušet pokus s jinou kapalinou. Vybral rtuť pro její vysokou hustotu a uložil svému žákovi Vivianovi pokus provést. Ten tak v roce 1643 učinil a shledal, že rtuť zůstane stát ve skleněné rource jen ve výšce 76 cm, nad ní je vakuum. Torricelli zavedl pojem „tlak vzduchu“ a tento pokus je známý jako *Torricelliho pokus*. [4] [6]



Obrázek 2: Torricelliho pokus [5]

Jak znázorňuje *Obr. 2*, při naklání trubice se hladina drží ve stále stejné výšce. Jakmile se hladina ustálí, hydrostatický tlak rtuťového sloupce v trubici se rovná tlaku okolního vzduchu

KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

působícího na volný povrch rtuti v nádobce. Stejný pokus by šel provést i s vodou, ale vzhledem k její relativně nízké hustotě bychom potřebovali hadici o délce minimálně 10 metrů. Následující příklad popisuje výpočet velikosti tlaku okolního vzduchu působícího na rtuť.

[Př. 1]

výška rtuťového sloupce $h = 75 \text{ cm} = 0,75 \text{ m}$

hustota rtuti $\rho = 13\,579,04 \text{ kg/m}^3$

tíhové zrychlení $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

$p = ? \text{ [Pa]}$

$$p = \rho \cdot g \cdot h = 13\,579,04 \cdot 9,81 \cdot 0,75 \quad (1)$$

$$p = 99\,907,79 \text{ Pa}$$

Tlak vzduchu rovnající se tlaku 75 cm rtuťového sloupce je zaokrouhleně 999 hPa, pro 76 cm rtuti pak 1 012 hPa. Právě po Torricellim je pojmenována jednotka *torr*, přičemž 1 torr je roven tlaku vyvolanému 1 mm sloupcem rtuti. Zavedený název jednotky je též *milimetr rtuťového sloupce*, či *mmHg*, odvozenou jednotkou je palec³ rtuťového sloupce značený inHg. Důležitým vztahem je 1013,15 hPa = 29,92 inHg. Používání těchto jednotek je rozšířeno především na západní polokouli.

Na Torricelliho pokusy navázal Francouz **Blaise Pascal** řadou přesných srovnávacích měření rtuťového sloupce v odlišných nadmořských výškách a svým výzkumem⁴ definitivně vyvrátil *horror vacui*. Mimo jiné se zabýval také působením tlaku v kapalinách, matematikou, jakožto vášnivý hráč položil základy teorie pravděpodobnosti a přispěl k rozvoji kombinatoriky. Na jeho počest jsou pojmenovány již zmíněná jednotka pascal, dobře známý Pascalův zákon, na kterém je založena celá hydraulika, v geometrii Pascalova věta o vztazích mezi body na kuželosečkách nebo třeba programovací jazyk Pascal. [6] [7]

³ 1 inch = 2,54 cm

⁴ spis *Traité de l'équilibre des liqueurs et de la pesanteur de la masse de l'air* (Pojednání o rovnováze kapalin a gravitaci hmoty vzduchu) sepsaným roku 1653, tištěným roku 1663

KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

1.2 Měření

Je samozřejmé, že s postupným rozšiřujícím se povědomím o existenci a působení tlaku vzduchu vznikala potřeba také tlak měřit, popřípadě zkoumat jeho chování a změny. V dnešní době máme již velké množství různých přístrojů, které dokáží měřit hodnoty tlaku s opravdu velkou přesností. K měření lze použít v podstatě jakýkoliv fyzikální děj, který je tlakem ovlivňován. Přístroje k měření tlaku se souhrnně označují **tlakoměry** a obvykle se skládají z **čidla**, jež reaguje na příslušný fyzikální děj a **indikátoru**, který reaguje na chování čidla. Tyto vjemy pak převádí na děj objektivně pozorovatelný zrakem. Mezi čidlo a indikátor může být zařazen **převodový člen**, který podle potřeby může reakci čidla zesílit, přenést na dálku nebo transformovat. S ohledem na kladené požadavky se tedy v praxi kombinují různé druhy čidel, indikátorů, potažmo převodových součástek v závislosti na velikosti měřeného tlaku, časové proměnnosti tlaku nebo třeba potřebné přesnosti měření.

V následující části textu jsou rozebrány různé způsoby měření tlaku vzduchu.

Široké spektrum tvoří **hydrostatické tlakoměry**. Za nejstarší z nich můžeme považovat kapalinovou trubici, kterou vynalezl sám Torricelli a která funguje přesně na principu, který byl popsán výše, tj. porovnává hydrostatický tlak média s tlakem okolního vzduchu. V meteorologické službě se lze setkat s velmi přesnými rtuťovými tlakoměry, které jsou rozšířeny o

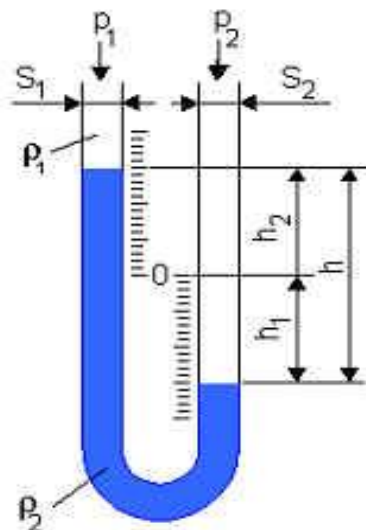
tzv. nonius neboli vernier, což je zařízení sloužící k přesnějšímu odečítání délek ze vzájemné polohy dvou stupnic.

Jedním z nejrozšířenějších zástupců pracujících na hydrostatické bázi je **U-tlakoměr s kapalinovým sloupcem**. Jedná se nejčastěji o skleněnou trubici do tvaru U, jak je patrné z *Obr. 3*. Tato trubice je naplněna manometrickou⁵ kapalinou (např. rtuť, vodou, alkoholem, tetrachlorem). Na jednom konci působí referenční tlak, který je předem definovaný (p_1), na druhém konci je připojen měřený tlak (p_2). V ustáleném stavu lze označit vztah mezi těmito tlaky jako

$$\Delta p = p_1 - p_2 \quad (2)$$

Po dosazení do rovnosti se vzorcem pro výpočet hydrostatického tlaku manometrického média (viz [Př1]) platí vztah

$$\Delta p = (\rho_2 - \rho_1) \cdot g \cdot h \quad (3)$$



Obrázek 3: Diferenční U-tlakoměr [10]

⁵ od slova MANOMETR – tlakoměr měřící přetlak, nicméně zaužívaný i jako výraz pro tlakoměr obecně

KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

přičemž ρ_1 je hustota vzduchu, ρ_2 hustota tlakoměrné kapaliny a g tíhové zrychlení. Po vyjádření výšky $h = \frac{p_1 - p_2}{(\rho_1 - \rho_2)gh}$ je patrné, že se měření tlaku převádí na měření délky. Jedná se o spolehlivé a poměrně přesné přístroje používané například v laboratořích. Rozsah měřitelného tlaku závisí na použité tekutině a délce trubice, pohybuje se v rozmezí $\Delta p = 10 \text{ Pa}$ až 500 kPa . [8] [9] [10]

Modifikací U-tlakoměru je nádobkový tlakoměr, který má jedno rameno rozšířené (nádobku). Změna výšky hladiny v nádobce je velmi malá, tudíž odečítání výšky hladiny probíhá pouze v jednom rameni. Pro výpočet tlaku pomocí tohoto zařízení platí vztah

$$\Delta p = (\rho_1 - \rho_2)gh_1 \left(\frac{S_2}{S_1} + 1 \right) \quad (4)$$

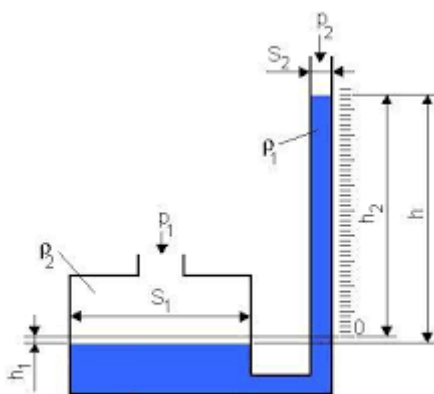
kde S_1 je průřez nádobky a S_2 průřez trubice, přičemž $S_1 > S_2$. Variací je mikromanometr neboli nádobkový tlakoměr se sklonným ramenem. Nakloněním ramene v horizontální rovině o úhel α v rozmezí $(0^\circ; 90^\circ)$ se zvýší citlivost přístroje a používá se pro měření velmi nízkých tlaků nebo malých tlakových rozdílů. Za předpokladu $S_1 \gg S_2$ platí vztah

$$\Delta p = p_1 - p_2 = (\rho_2 - \rho_1)gle \quad (5)$$

kde l je výchylka kapalinového sloupce v trubici a e je „převod tlakoměru“, přičemž platí:

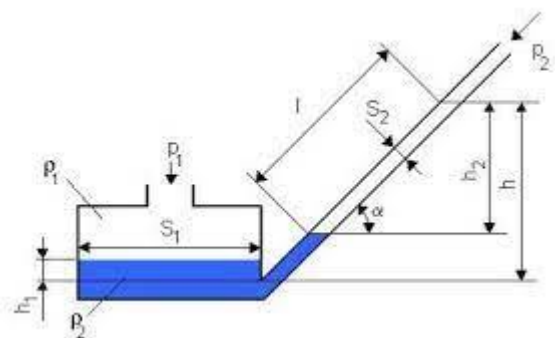
$$e = \frac{S_2}{S_1} + \sin \alpha \quad (6)$$

U komerčních výrobků nabývá hodnot $e = 1; 0,5; 0,25$ atd. Měřený tlak se vypočte z výchylky l kapalinového sloupce v trubici. [10] *Obr. 4* a *Obr. 5* znázorňují zmíněné tlakoměry.



Obrázek 4: Nádobkový tlakoměr

[10]



Obrázek 5: Nádobkový tlakoměr se sklonným ramenem

[10]

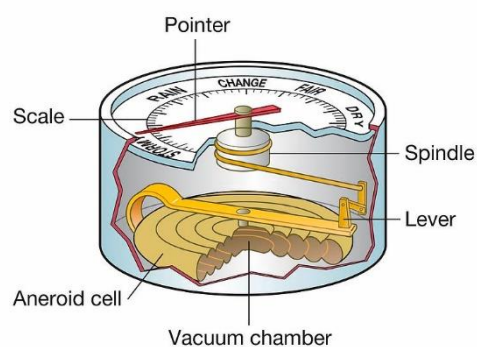
KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

Nevýhodou výše zmíněných nádobkových tlakoměrů je to, že průřez nádoby i trubice musí být konstantní, jinak by se měnila hodnota převodu e . Z tohoto důvodu musí být tlakoměry kalibrovány.

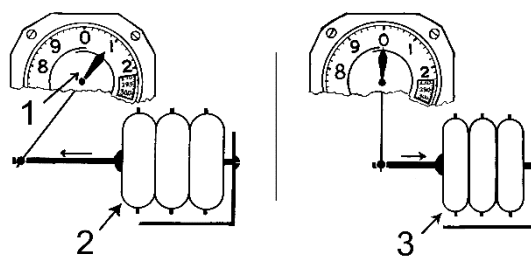
V neposlední řadě je důležité zmínit také Prstencový tlakoměr, což je zařízení, jehož hlavní část tvoří dutá kruhová otočná trubice, zavěšená ve svém středu. Uvnitř trubice je kapalina, která spolu s přepážkou dělí vnitřní prostor na 2 části, které jsou pak napojeny každá na jiné tlakové prostředí. Na spodní straně prstence je umístěno závaží, které určuje základní polohu. Pokud je mezi tlaky přivedenými do prstence rozdíl, v těžišti plochy se vytvoří síly, které způsobí kroutící moment a ten natočí prstenec o určitý úhel. Z ukazovacího zařízení spojeného k prstenci, potažmo ze snímače úhlové výchylky je pak možné číst potřebné údaje.

Existují i další, složitější hydrostatické tlakoměry jako například tlakoměr typu Ascania nebo velmi přesný Betzův tlakoměr, u kterého plove na hladině skleněný plováček se skleněným průhledným měřítkem, ty ale není nutné pro potřeby této práce blíže rozvádět. Hydrostatické tlakoměry lze považovat obecně za většinou jednoduché, přesné a spolehlivé přístroje používané zejména v meteorologických laboratořích. Jejich nevýhodou je skutečnost, že neposkytují signál vhodný pro dálkový přenos dat nebo pro další zpracování v řídicích obvodech. [9] [10]

Další zařízení používané pro měření tlaku vzduchu je **Aneroid**, vynalezen v roce 1844 francouzským samoukem Lucienem Vidiem. Ten byl tak horlivě zapálen do svého díla, že do výzkumu aneroidu věnoval značné množství finančních prostředků. Původní označení bylo *barometre anéroide*, což v překladu znamená „tlakoměr bez kapaliny“. Jedná se o zařízení, jehož základ tvoří tenkostěnná kovová krabička (Vidiho dóza viz *Obr. 6*), uvnitř které je vakuum. Na pružné stěny krabičky působí atmosférický tlak a méně či více je prohýbá. Deformace stěn je následně přenášena na ručičku, která na stupnici ukazuje vlastní tlak. Kromě jednotek



Obrázek 6: Aneroid [11]



Obrázek 7: Barometrický výškoměr [12]

KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

tlaku může být stupnice navržena tak, že přístroj funguje jako výškoměr v letadle a místo tlaku odečítá výšku ve stopách nebo metrech. *Obr. 7* v pravé části znázorňuje působení většího tlaku na zařízení, které indikuje nižší výšku, v levé části pak působení nižšího tlaku, analogicky tedy větší výšku. Na rozdíl od rtuťových tlakoměrů je práce s aneroidem podstatně jednodušší, přístroj je celkově menší, uzavřený (nehrozí únik rtuti) a podstatně odolnější, protože výrazný skleněný prvek je pouze sklíčko chránící číselník a nehrozí tedy rozbití důležitých částí přístroje. Nevýhodou aneroidu oproti rtuťovým tlakoměrům je nižší přesnost. [12]

1.2.1 Barograf

Barograf je tlakoměr vybavený speciálním psacím ramenem, které svými pohyby zaznamenává poklesy a vzestupy tlaku na rotující svitek papíru. V minulosti byl barograf předním nástrojem lidí, kteří předpovídali počasí, ale i námořníků a dalších pozorovatelů tlakových změn. Následné shromažďování svitků a jejich studium poskytovalo výborný vhled do front, obecných atmosférických změn nebo i povětrnostních systémů a umožnilo do jisté míry uchování záznamů pro mladší generace. V současnosti jsou staré samo-záznamové verze do značné míry nahrazeny počítačovými verzemi a digitálními barografy, nicméně staré kusy jsou pořád cenné za své řemeslo. [13]

Počátky zapisování chování tlaku vzduchu byly již v 17. století. Aby bylo v té době možné zaznamenat určité vzorce počasí, museli majitelé tlakoměrů stát u svých přístrojů, pečlivě sledovat jejich chování a zapisovat poznámky. Zavedení barografů v 19. století, které fungovaly na principu aneroidu, poskytlo ucelenější způsob sledování tlakových změn. Jules Richard, opět Francouz, byl vynálezce, který si v roce 1880 nechal patentovat záznamový barometr, jenž zapisoval perem změny tlaku na papír připevněný k otáčejícímu se válci. Tento válec byl



Obrázek 8: Letecký barograf Richard [14]

KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

poháněný hodinovým strojkem. Následně tyto barografy, ale i jiné přístroje, léta úspěšně vyráběl ve své firmě *Société Richard Frères*⁶. Existoval také letecký barograf, jenž byl uzpůsobený k instalaci do letounu a zaznamenával různé výkony letadla, jako například průběh výšky letu v závislosti na čase. Toto zařízení, znázorněno na *Obr. 8*, se tak stalo velmi důležitou součástí mnoha letadel, v obměněné formě bylo i součástí československých letadel před druhou světovou válkou. [14]

Zvláštní význam mají barografy také na moři, protože pro bezpečnou navigaci je, podobně jako u letadel, nezbytné mít povědomí o meteorologické situaci, respektive o předpovědi počasí. Pokles tlaku vzduchu obvykle znamená příchod oblačnosti a deštivého počasí, zvýšení naopak příchod slunečného počasí s malou oblačností. Kvůli neustálému pohybu lodi je obtížné předpovídat počasí pomocí obyčejného barografu, protože právě nejruznější rázy a nepravidelné pohyby lodi zkreslují zaznamenávání tlakové tendence. Z tohoto důvodu byly vyvinuty speciální mořské barografy, ve kterých je mapovací papír i záznamové zařízení ukotveno tak, aby pohyby lodi nenarušovaly práci přístroje.

Jak již bylo zmíněno, většina záznamových barografů, které lze stále najít na trhu, jsou starožitné modely. Nová zařízení jsou už téměř všechna výhradně digitální, což vědcům umožňuje slučovat, digitalizovat nebo dle potřeby rychle porovnávat uložené grafy. Nicméně způsob provedení u většiny původních modelů se ukázal být tak přesným, že mnoho z nich funguje stále v perfektním stavu, a i díky historické hodnotě často velí velmi vysokým cenám. [13]

1.2.2 Rekordy měření

V následující podkapitole jsou vypsána jak světová, tak i česká (potažmo rakousko-uherská) aktuálně platná⁷ minima a maxima v měření tlaku vzduchu. Všechny údaje jsou redukovány na hladinu moře. [15]

Nejvyšší tlak vzduchu:

svět: 1083,8 hPa Agata, Sibiř, Rusko, 31. 12. 1968 (při teplotě -46 °C)

ČR: 1055,4 hPa Hurbanovo, okres Komárno 24. 1. 1907 (dnes SR)

Nejnižší tlak vzduchu:

svět: 870,0 hPa supertajfun Tip, 480 km západně od ostrova Guam v Tichém oceánu

⁶ = bratři Richardové

⁷ k 14. červenci 2021

KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

12. 10. 1979

ČR: 970,1 hPa Hradec Králové, 2. 12. 1976

Absolutní amplituda tlaku vzduchu:

svět: 213,8 hPa ; ČR: 85,3 hPa

KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

2 Tlak a atmosféra

Tlak vzduchu se zásadním způsobem podílí na mnoha meteorologických jevech, nebo je jimi do určité míry ovlivňován. První část této kapitoly je zaměřena na mezinárodní standardní atmosféru, druhá část rozvíjí chování tlaku vzduchu v atmosféře a s ním spojeny i nejrůznější tlakové útvary.

2.1 Mezinárodní standardní atmosféra

Mezinárodní standardní atmosféra (MSA, angl. ISA) představuje idealizovaný model atmosféry, vzorový stav se vzorovými parametry, jaké by atmosféra měla, pokud by byla uvedena do vyvážené a vyrovnané klidové polohy bez jakékoli dynamiky. MSA předpokládá neměnnost atmosféry v prostoru a čase. Zejména pro potřeby letectví ji v roce 1952 zavedla Mezinárodní organizace pro civilní letectví⁸. Reálná atmosféra se od té standardní odchyluje prakticky neustále a jen skrze dlouhodobé průměrování skutečných atmosférických parametrů by se dalo přiblížit k modelové MSA. Slouží například ke kalibraci výkonových charakteristik, přístrojů, letových vlastností, normálování podmínek na letištích atd. Hodnoty MSA odpovídají průměrným hodnotám naměřeným v mírných zeměpisných šířkách Země a je to souhrn mnoha parametrů, jako je teplota, tlak, hustota a případně jejich prostorové gradienty. [16] [17]

Dle MSA má vzduch specifické homogenní chemické složení, jehož objem tvoří ze 78 % dusík, 21 % kyslík a 1 % ostatní plyny a tíhové zrychlení je konstantní $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Následující parametry jsou vztaženy k úrovni hladiny moře:

- teplota vzduchu $15 \text{ }^\circ\text{C}$
- tlak vzduchu $1013,15 \text{ hPa}$
- hustota vzduchu $1,225 \text{ kg/m}^3$

Dále platí, že je vzduch považován za ideální plyn, přičemž beze zbytku platí **stavová rovnice plynů**

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (7)$$

kde ρ je hustota (kg/m^3), p je tlak (pa), R je měrná plynová konstanta pro suchý vzduch ($R = 287,04 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$) a T je absolutní teplota v Kelvinech.

⁸ =ICAO – International Civil Aviation Organisation

KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

Vertikální gradient v troposféře od hladiny moře až do tropopauzy je definován jako

$$t = 15 - (0,0065z) \quad (8)$$

kde z je výška v metrech nad střední hladinou moře. Z toho je patrný vertikální teplotní gradient 0,00065 K (respektive °C) na každý 1 metr výšky. Lépe představitelný je přepočet 6,5 °C na 1 km výšky. V letectví se pro vyjádření výšky dává přednost angloamerickým měrným jednotkám – feet (stopy)⁹, a lze tak vertikální teplotní gradient vyjádřit jako 2 °C na každých 1000 ft (přesně 0,00198 ft/m). Teplota takto klesá až do tropopauzy, kde zůstává určitou dobu na -56,5 °C. Takto by to bylo ideálně podle MSA, v reálu se výška tropopauzy nad rovníkem a nad póly liší. Tím je způsobeno, že kvůli mohutnější atmosféře může nad rovníkem teplota klesnout až k -70 °C, nad póly zase zpravidla neklesá pod -45 °C. [16]

Závislost tlaku vzduchu na nadmořské výšce je vyjádřena **barometrickou rovnicí**

$$p = p_0 e^{-\frac{g\Delta z}{RT}} \quad (9)$$

kde p_0 je tlak na spodní hladině (hladině moře), p je tlak v horní hladině, g je tíhové zrychlení, R je již zmíněná plynová konstanta a T je průměrná teplota vrstvy mezi hladinami p_0 a p v Kelvinech. Člen Δz představuje výškový rozdíl v metrech mezi tlakovými hladinami. V případě potřeby alespoň orientační hodnoty tlaku v určité výšce lze použít pomůcku, že tlak vzduchu klesne každých 5500 metrů výšky vždy na polovinu své předchozí hodnoty. Z barometrické rovnice je patrná velmi důležitá skutečnost, a sice že se tlak s výškou snižuje exponenciálně na rozdíl od teploty, která klesá lineárně. Zde je důležité poznamenat, že reálná atmosféra je tzv. *baroklinní*, což znamená, že se v ní plochy se stejným tlakem a k nim podle MSA přidělené plochy s danou teplotou rozmanitě prolínají. Tato skutečnost má za následek dynamiku atmosféry a změny v počasí. V MSA to tak ale není, ta má ke každé tlakové hladině přesně definovanou teplotu, která se nemění – nazývá se proto *barotropní*. [16]

Barický stupeň udává výšku, o kterou je třeba se v atmosféře vertikálně posunout, aby byla zaznamenána změna tlaku o 1 hPa. Barický stupeň lze odvodit z barometrické rovnice a u hladiny moře je 27 ft. S rostoucí výškou roste i barický stupeň, pokud tedy bude v 5500 metrech tlak vzduchu poloviční, barický stupeň bude dvojnásobný tj. 54 ft. V *Tab. 2* jsou vypsané hodnoty barického stupně ve vybraných tlakových hladinách.

⁹ 1 ft = 0,3048 m

KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

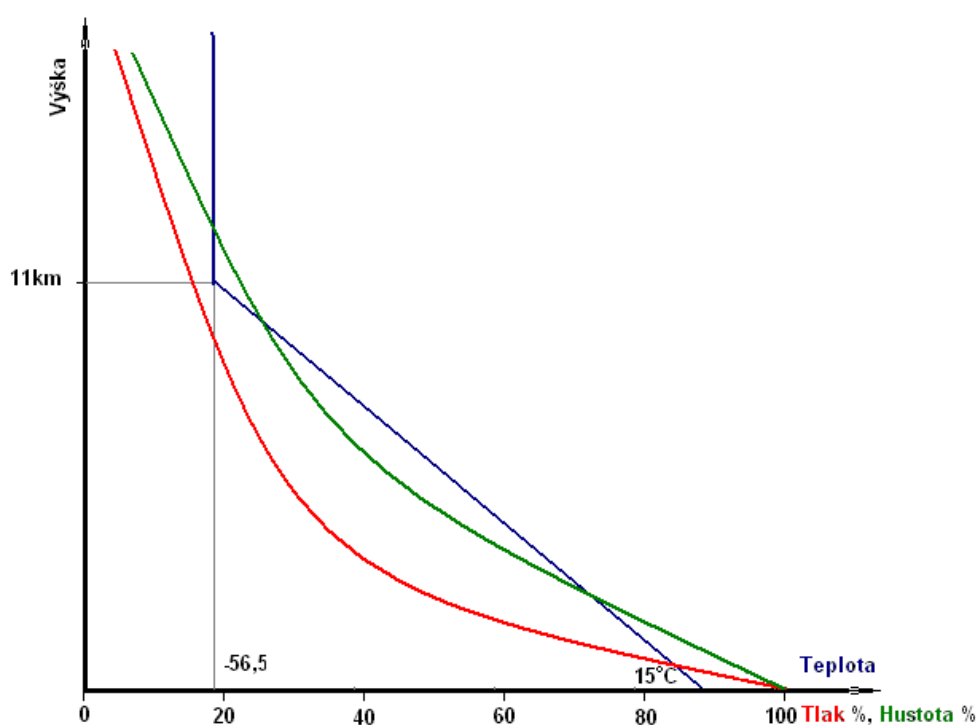
Tabulka 2: Barický stupeň v závislosti na rostoucí výšce [16]

Výška (ft)	Tlak (hPa)	Barický stupeň (ft/hPa)
0	1013,25	27
10 000	697	37
18 000	506	47
40 000	188	111

Poslední zmíněná veličina byla hustota, jejíž křivka poklesu s rostoucí výškou se velmi podobá té tlakové. Největších hodnot nabývá v nízkých hladinách, pokles je exponenciální stejně, jako tomu bylo u tlaku, a výpočet poklesu hustoty s výškou se vypočítá ze vztahu

$$\rho = 1,225 \left(1 - \frac{z}{44308}\right)^{4,2553} \quad (10)$$

kde z je výška nad mořem v metrech. V reálné atmosféře může nastat případ, kdy bude hustota s výškou růst. Děje se tak při *jevu spodního zrcadlení*, kdy je povrch Země nahřátý velmi silně, což má za následek větší ohřev vzduchu těsně nad povrchem, než je běžné. Takto nahřátá vrstva může dosahovat do výšky v řádu jednotek decimetrů. Teplota pak klesá tak rychle, že se tlak vzduchu s rostoucí výškou sice snižuje, ale hustota roste.



Obrázek 9: Průběh teploty, tlaku a hustoty s rostoucí výškou [17]

KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

Na jednoduchém grafu znázorněném na *Obr. 9* lze číst průběh tlaku, hustoty a teploty v závislosti na rostoucí výšce dle MSA. Osa *y* je pro všechny 3 veličiny společná, představuje výšku. Osa *x* pro tlak a hustotu udává procenta hodnoty, kterou mají na hladině moře. Při zemi tedy začínají na 100 %, poté klesají. Pro teplotu představuje hodnoty ve °C, kde při zemi je hodnota 15 °C, poté lineárně klesá až k -56,5 °C.

2.2 Tlakové útvary v atmosféře

Tlakový útvar, též synoptický¹⁰ útvar barický, je část tlakového pole atmosféry s charakteristickým rozdělením tlaku vzduchu. Existence tlakových útvarů je podmíněna nerovnoměrnému rozdělení tlaku vzduchu v atmosféře, tedy i proudění vzduchu, často popsané průběhem *izobar* nebo *izohyps*. Tyto pojmy jsou pro pochopení následujícího textu velmi zásadní a je důležité jim rozumět.

V obou zmíněných případech se jedná o izolinie, což jsou čáry, které spojují na mapě místa se stejným určitým prvkem, např. se stejnou fyzikální veličinou. Jako **izobary** jsou v meteorologii označovány čáry, které spojují místa se stejnou hodnotou atmosférického tlaku. Tyto čáry se nikdy neprotínají, mohou být kresleny s různým, ale konstantním krokem (2, 4 nebo 5 hPa)¹¹ a mohou mít dvojí uspořádání – uzavřené a otevřené. Pokud jsou izobary uzavřené, jedná se o tlakovou níž (cyklónu) nebo tlakovou výš (anticyklónu), otevřené zase představují brázdy, výběžky, hřebeny a jiné útvary nízkého nebo vysokého tlaku. Izobary se zakreslují na přízemní synoptické mapy, kde charakterizují pole atmosférického tlaku na jedné hladině s nadmořskou výškou 0 metrů. Naopak výškové synoptické mapy zobrazují pole nadmořských výšek jedné tlakové hladiny. **Izohypsa** je křivka, která spojuje místa se stejnou geopotenciální výškou tlakové hladiny. [18]

Svou roli v tlakových útvarech hraje také Coriolisova síla. Jedná se o zdánlivou sílu (nekoná práci), která působí na tělesa pohybující se v neinerciální vztažné soustavě (planeta Země) tak, že mění jejich vzdálenost od osy otáčení. Tělesa na severní polokouli, která se směrem od rovníku pohybují ve směru poledníků, stáčí doprava, na jižní polokouli naopak doleva.

¹⁰ od slova synopse z řeckého *synoptikos*, znamená „celkový přehled“

¹¹ například 995, 1000, 1005 atd.

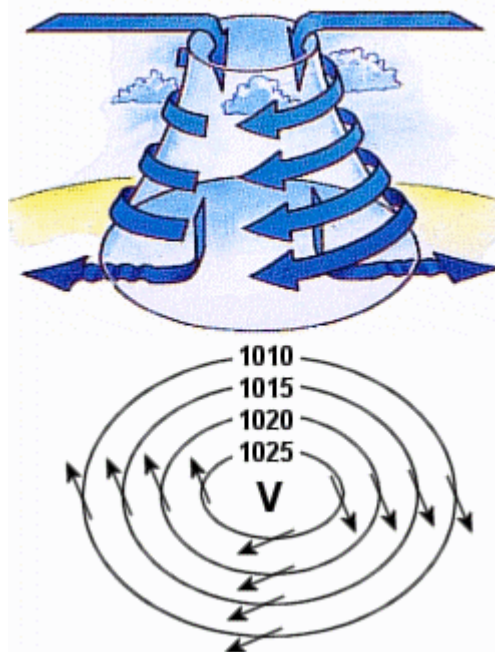
KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

2.2.1 Uzavřené tlakové útvary

Uzavřené tlakové útvary mají alespoň jednu izobaru do tvaru písmene O. Jak již bylo předesláno, rozlišují se v zásadě dva – tlaková výše a tlaková níže.

Tlaková výše (anticyklóna) je oblast tlaku vzduchu, uvnitř které je vyšší tlak než v okolí. Vykreslením izobar směrem k jejímu středu je pozorovatelný nárůst tlaku. Může být malá a nevýrazná, nebo naopak v horizontální rovině dosahovat délek až tisíců kilometrů, v takovém případě se nazývá *rozsáhlá*. Při přílivu teplého vzduchu mají nadmořské výšky jednotlivých tlakových hladin větší hodnoty než dle MSA, protože v teplém vzduchu klesá atmosférický tlak s rostoucí výškou pomaleji než ve studeném vzduchu. Na výškové synoptické mapě lze pak pozorovat *výškovou* tlakovou výši, která na přízemní povětrnostní mapě patrná být vůbec nemusí. Ke vzniku tlakové výše v přízemních hladinách je zapotřebí ochlazení vzduchové hmoty. Aby byla patrná, nestačí jen krátkodobé noční ochlazení, ale musí se jednat o delší časový interval, minimálně několikadenní. Příkladem může být dlouhodobé ochlazování vzduchu nad asijskou částí Ruska v zimě. Jak se vzduch více a více prochladuje, tlak vzrůstá a vzniká zde mohutná tlaková výše. Takto vzniklá anticyklóna nabývá značně velkých rozměrů, během každé zimy zasahuje i na rozsáhlá území vně Ruska. Na několik dní, dokonce i týdnů ovlivňuje počasí nejenom ve střední, ale i západní Evropě. Zasahuje samozřejmě i do značné části Asie a přináší jasné, ale nesmírně mrazivé počasí, což ještě upevňuje její stabilitu. Podobný, ale menší útvar se formuje v zimě i nad severoamerickým kontinentem. [19]

Proces, během kterého se vyvíjí tlaková výše, se nazývá anticyklogeneze. Pokud teplotní změny vzduchové hmoty vyvolají nárůst tlaku vzduchu, jsou zde příhodné anticyklogenezní podmínky. Pro vrchní část anticyklóny jsou charakteristické sbíhavé proudy vzduchu (konvergence), které sestupují a adiabaticky¹² se oteplují. V nižších polohách se pak od středu rozbíhají a směrem k okrajům divergují, jak naznačuje *Obr. 10*. Izobary znázorňují zvyšování tlaku směrem ke středu, kde je umístěno písmeno



Obrázek 10: Tlaková výše [20]

¹² vlivem komprese, bez výměny tepla s okolím

KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

V (v anglické literatuře H), což označuje místo s největším tlakem. Vlivem Coriolisovy síly se anticyklóny na severní polokouli stáčí po směru hodinových ručiček, na jižní proti směru hodinových ručiček.

Charakter počasí závisí na mnoha faktorech. Nad oceánem má vzduch jiný teplotní režim a více vlhkosti v porovnání s pevninským. Záleží také na ročním období – ve střední Evropě se bude letní anticyklonální počasí značně lišit od toho zimního. Na Zemi lze ale nalézt i místa, kde se tlakové výše vyskytují trvale a příliš se nemění. Jedná se především o oblasti v subtropích jižně i severně od rovníku podél rovnoběžek na zhruba 30° zeměpisné šířky, kde lze nalézt pásy tlakových výší. Vlivem trvalého jasného a slunečného počasí s minimálním počtem deštivých dnů je povrch velmi vyprahlý, takže zde prakticky neroste vegetace a jedná se především o pouště nebo pusté hory.

Za normálních podmínek se tlaková výše formuje obvykle za studenou frontou, protože studený vzduch nasouvající se za frontou poskytuje příhodné anticyklogenezní podmínky. Na barografech je možné sledovat kontinuální pokles tlaku (vlivem studeného vzduchu) až do přechodu fronty, poté začíná vzrůstat a někdy i velmi strmě. To je právě vlivem anticyklóny, která se za frontou posouvá v jejím směru. V letním období se studená fronta nese ve znamení bouřkového počasí se silným nárazovým větrem (húlavou), proto počasí tlakové výše není hned patrné. To se začne projevovat až postupně odezní velké množství oblačnosti spolu s deštěm a větrem. Její přední část, která se hned nasouvá na místo právě prošlé fronty se nazývá přední část tlakové výše, vítr v ní vane ve směru postupu. To je oblast, která je ve velkém vyhledávána piloty sportovních kluzáků, protože ve výšce se stále udržuje relativně chladný vzduch, kdežto při zemi se poměrně intenzivně nahřívá. Tomu přispívá i stav, kdy se obloha vyjasní a nic nebrání slunečním paprskům ohřívát povrch. Teplý vzduch, jenž má tendenci stoupat, s sebou může brát i vlhkost po právě proběhlém dešti a ve výšce konverguje, což má za následek vznik kupovité oblačnosti. Kupovitá oblačnost, která je důkazem konvekce nicméně není pravidlem. Pokud vzduch nemá dostatečnou vlhkost, stoupá a konverguje i tak, avšak bez formace mraků. Tento jev se nazývá *bezoblačná konvekce*. [19] [20]

Pokud nastupuje mohutná tlaková výše, vítr se i přes známou poučku, a sice že vane z výše do níže, ztišuje. Děje se tak zejména v nižších polohách, například v údolích se může během noci s klesající teplotou tvořit radiační mlha. Z rána vítr zesiluje, s východem slunce se na tačka bezoblačné obloze začnou v malé výšce objevovat první kupovité mraky, až postupně zaplní téměř celou oblohu. S průběhem dne se dohlednost plynule snižuje, vyskytují se přeháňky a silný vítr, ale k večeru se opět vyjasní a vítr ustane. Po jasné noci se slabým nebo žádným větrem je průběh následujícího dne velmi podobný tomu předchozímu, ale počasí má menší razanci. Pokud barografy stále indikují nárůst tlaku, znamená to posun anticyklóny,

KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

a počasí z přední strany se změní na počasí z jejího středu. Ohřívající se vzduch, který se sbíhá a klesá středem zapříčiňuje rozpad případné oblačnosti. Obloha je tedy jasná, přes den je slabý, proměnlivý vítr a teplota v noci už tolik neklesá. Pokud se jedná o chladnou část roku typickou například pro Česko, přes noc se vlivem radičního ochlazování v nížinách usazuje chladný vzduch, který má za následek mlhy. Po několika dnech jsou mlhy nebo souvislá nízká vrstva oblačnosti typu *stratus* na většině území, což má za následek sychravé počasí spojené především s mrholením. Horní hranice studeného vzduchu bývá kolem 1 000 metrů nad mořem, takže na pohraničních horách je možné pozorovat typické anticyklonální počasí s jasným nebem, vynikající dohledností a citelně teplým vzduchem. [19]

Vysoká cirrovitá oblačnost, slabý proměnlivý vítr a počasí beze srážek informuje o příchodu zadní části tlakové výše. Teploty v noci i přes den jsou vyšší, je sucho a jasno a v samém závěru anticyklonálního počasí je možný postupný výskyt bouřek z tepla, což jsou bouřky, které vznikají uvnitř vzduchové hmoty – tedy bez vlivu atmosférických front.

Tlaková níže (cyklóna) je oblast znázorněná opět alespoň jednou uzavřenou izobarou. Směrem k jejímu středu tlak vzduchu klesá. Svou stavbou je v porovnání s tlakovou výší podstatně složitější. Její proces formování se nazývá cyklogeneze. Vznik tlakové výše je ovlivněn termodynamikou dvou sousedních vzduchových hmot, které mají různou teplotu. Mezi nimi je hraniční vrstva o tloušťce několika kilometrů. V horní troposféře při horizontálním rozměru stovek kilometrů mohou být tlakové hladiny teplého vzduchu i o několik stovek metrů výš než v tom studeném. Relativní topografie obou hladin je v teplém vzduchu větší, přičemž horizontální gradient relativní topografie vyvolá vznik větru. Lze to přirovnat k proudění vody ve svažitém terénu, která vlivem gravitačního zrychlení stéká do nižších míst. V takto vysokém prostředí není žádná terénní překážka, která by bránila volnému proudění větru, který tak může nabírat i velmi vysokých rychlostí. Na severní polokouli projevem Coriolisovy síly částice vzduchu při proudění uhýbají doprava, opačně působí síla horizontálního barického gradientu – jedná se o tzv. geostrofický vítr. Ustálením vyváženého stavu obou sil vznikne silný výškový vítr, který je jedním ze startovních mechanismů rozvoje tlakové výše. [21]

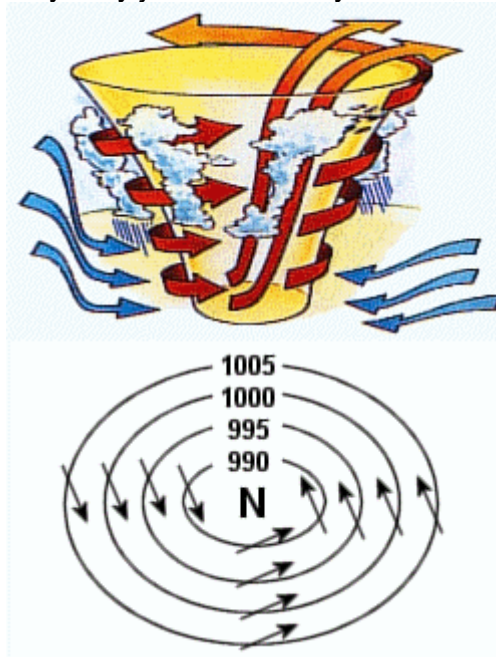
Jakmile se teplý vzduch začne vtlačovat do studeného, rozhraní mezi vzduchovými hmotami se deformuje a utváří se frontální vlna. V místě teplé advekce¹³ nastávají ideální podmínky cyklogeneze – klesá hustota vzduchu, snižuje se tlak, až se objeví první uzavřená izobara

¹³ = pohyb vzduchové hmoty

KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

a vzniká tlaková níže. Se změnou tlakového pole souvisí také změna proudění vzduchu a v zásadě mohou nastat dvě situace: Buď se proudění vzduchu na základě změny tlakového pole přetvoří natolik, že dojde k zesílení teplé advekce, nebo budou mít důsledky změn opačný účinek a dojde k zániku celého útvaru.

Přední část cyklóny bývá často současně zadní částí ustupující anticyklóny, takže v nižších vrstvách je relativně studená vzduchová hmota. Vpředu cyklóny je málo studený vzduch, ale pořád je chladnější než vzduch v teplém sektoru. Studený vzduch má větší hustotu, takže je těžší, a proto se udržuje v nízkých hladinách blízko u zemského povrchu. Vpředu ve směru proudění vzniká teplá fronta a studený vzduch na zádi se formuje do studené fronty. Ve spodní části tlakové níže konverguje vzduch ze všech stran a vystupuje vzhůru, jak lze vidět na *Obr. 11*. Ve vyšších hladinách je nižší teplota vzduchu, což má za následek jeho ochlazení a následnou kondenzaci. To vede ke tvorbě rozsáhlých oblačných polí se zastoupením hlavně vrstevnatých oblaků. S přibližující se frontou začíná oblačnost mohutnět, tvoří se v nižších patrech, objevují se mraky se smíšeným složením (vodní kapky a ledové krystalky) a začínají vypadávat první srážky. V závislosti



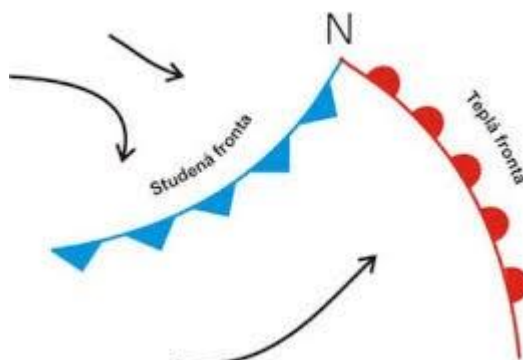
Obrázek 11: Tlaková níže [20]

na ročním období se jedná buď o déšť, sníh, nepravidelné srážky nebo nejsou srážky vůbec. V zadní části tlakové níže postupuje studená fronta, na jejímž čele se formuje kumulovitá bouřková oblačnost. Tam se srážky objevují až za frontou. Nejprve trvalý déšť, později přeháňky a zadní část cyklóny postupně přechází v přední část anticyklóny. [21]

Studená fronta se pohybuje rychleji než teplá. V průběhu sblížování je teplý vzduch vytlačován do výšky a na mapách vyšších tlakových hladin je patrný jakýsi výběžek vytlačeného vzduchu, který zasahuje nad frontální rozhraní. Během životnosti tlakové níže studená fronta dostihne tu teplou, spojí se a vzniká tzv. okludovaná (okluzní) fronta. Bod spojení se nazývá *okluzní bod* a je to místo s nejmohutnější oblačností, potažmo srážkami. Okludování cyklóny je její závěrečnou fází. Okludovaná fronta je z obou stran obklopena stejnou vzduchovou hmotou, může ale nastat situace, kdy teplotní rozdíl mezi oběma stranami fronty bude tak razantní, že se začne vlnit. V takovém případě se z jedné části okludované fronty stane teplá fronta a druhá část se přemění na studenou frontu. Mezi nimi se zregeneruje tlaková níže do takové

KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

míry, jako by se jednalo o novou, a může existovat ještě celou řadu dalších dnů. [21]
Na Obr. 12 je znázorněno sblížování teplé a studené fronty.



Obrázek 12: Teplá a studená fronta [22]

2.2.2 Ostatní tlakové útvary

Pro tlakové útvary patřící do této kategorie je charakteristickým znakem neuzavřené tlakové pole. Hřeben vysokého tlaku vzduchu je pásmo vyššího tlaku vzduchu, které vybíhá z tlakové výše nebo odděluje dvě tlakové níže. Vzniká v místech s anticyklonálním zakřivováním izobar nebo izohyps, což mohou být například oblasti, kde dochází k ochlazení vzduchové hmoty. Svým počasím se podobá tlakové výši, v níž se pak často přetváří.

Brázda nízkého tlaku vzduchu je pásmo nižšího tlaku, kde nejnižší tlak je v ose brázdy. Může se utvořit v nepravidelně se vyplňující tlakové níži, v závětrí horských překážek a obecně v místech s intenzivní teplou advekcí. Dochází v ní ke konvergenci proudění, které dále stoupá a za vhodných vlhkostrních podmínek se vyvíjí oblačnost. V teplých částech roku jsou pro brázdy nízkého tlaku typické bouřky.

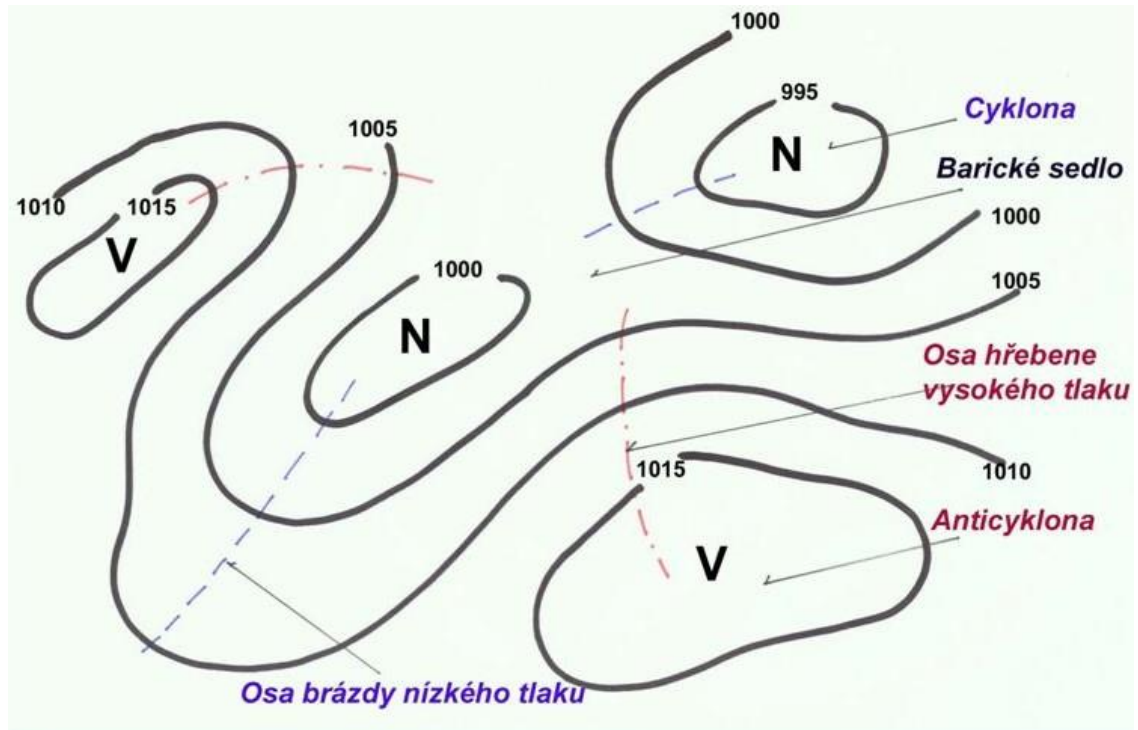
Tlakové sedlo je část barického pole mezi několika protilehlými hřebeny a brázdami, případně tlakovými výšemi a nížemi. Horizontální tlakový gradient je v prostoru sedla blízký nule, což znamená, že se tlak vůbec nemění, nebo kolísá jen velmi málo. Z toho důvodu je zde téměř bezvětří, nebo fouká jen slabý proměnlivý vítr. V zimě se v takových oblastech tvoří mlhy, v létě jsou náchylné na tvorbu bouřek z tepla. [21] [23]

V meteorologické literatuře se lze dočíst i o dalších útvarech, jako například *klín vysokého tlaku vzduchu*, *výběžek nízkého tlaku vzduchu*, *výběžek vyššího tlaku vzduchu*, *pás nízkého*

KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

tlaku vzduchu, pás vysokého tlaku vzduchu, přemostění nebo brázda tvaru V. Ve většině případů se však jedná buď o útvary popsané v této kapitole, nebo jejich kombinaci. [18]

Na Obr. 13 jsou znázorněny popsané tlakové útvary:



Obrázek 13: Tlakové útvary [24]

KAPITOLA IV

Praktická část

3 Tlak vzduchu a letectví

Tlak vzduchu je nedílnou součástí každodenního provozu letadel. Následující část textu se věnuje práci s tlakem v běžné letecké praxi. Jsou zde rozebrány jednotlivé druhy tlaků, práce s tlakem v kokpitu i meteorologická zpráva METAR.

3.1 Druhy tlaku vzduchu

Tlak, který je naměřený na letišti, se přepočítává na střední hladinu moře. Toho lze docílit dvěma způsoby. V meteorologii se využívá barometrické rovnice viz (9), která byla popsána v předchozích kapitolách. Do ní se dosadí staniční tlak, nadmořská výška stanice a myšlená průměrná teplota vrstvy mezi mořskou hladinou a nadmořskou výškou stanice. Ta se vypočítá ze **staniční teploty vzduchu** a teplotního gradientu $6,5\text{ °C}$ na jeden kilometr výšky, pomocí kterého se odhadne teplota vzduchu stanice, pokud by ležela na hladině moře. Takto zjištěný tlak se označuje třípísmenným Q-kódem **QFF**. [25]

Druhým způsobem přepočtu je opět užití barometrické rovnice, nicméně místo aktuální staniční teploty vzduchu se použije teplota podle mezinárodní standardní atmosféry. Na hladině moře se předpokládá teplota 15 °C a dle stejného gradientu $6,5\text{ °C/km}$ se vypočte teplota na stanici, která by odpovídala podmínkám za MSA. Pak už se stejně jako v předchozím případě

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

vypočte průměrná teplota mezi vrstvami a po dosazení do barometrické rovnice se získá tlak **QNH**. Rozdíl mezi nimi je tedy ten, že QFF uvažuje skutečnou teplotu naměřenou na stanici, zatímco QNH uvažuje teplotu dle MSA. Z logiky věci vyplývá, že rovnost mezi oběma tlaky bude pouze tehdy, když se podmínky při měření budou rovnat těm za MSA. V meteorologických synoptických mapách je uváděn QFF, v letectví se zase dává přednost QNH.

Se zmíněnými tlaky se pojí také jejich vztah související s různými meteorologickými a polohovými okolnostmi. Předpokládá se, že inverze tlaku vzduchu na rozdíl od teploty nebo hustoty není možná. Pokud bude teplota vzduchu nižší než MSA, QFF bude větší než QNH. To lze vyvodit z jednoduché představy, kdy studený vzduch je těžší a má větší hustotu, působí tedy větší silou. Analogicky při teplotních podmínkách vyšších než MSA bude mít QNH větší hodnotu oproti QFF. Zajímavá situace nastává v případě, kdy se stanice (letišťe) nachází pod úrovní hladiny moře. Jako příklad lze uvést letišťe Bar Yehuda v Izraeli (LLMZ), které má nadmořskou výšku -378 metrů. Pomyslný sloupec vzduchu směřující z letišťe vzhůru nabývá za podmínek MSA ve výšce 378 metrů nad letišťem hodnotu tlaku vzduchu 1013,25 hPa. Když budou podmínky pod MSA, a sice studenější těžší vzduch, pomyslný sloupec bude mít tlak 1013,25 hPa v menší výšce než na úrovni hladiny moře. Tam bude tedy tlak nižší, neboť tlak s výškou klesá. V takovém případě bude QNH vyšší než QFF. Je to tedy přesně naopak oproti letišťím s kladnou nadmořskou výškou. [25] Pro lepší orientaci shrnuje vztahy tlaku QNH a QFF *Tab. 3*:

Tabulka 3: Vztah QFF a QNH [25]

Letišťe s nadmořskou výškou > 0	
Studenější vzduch oproti MSA	QFF > QNH
Teplejší vzduch oproti MSA	QFF < QNH
Letišťe s nadmořskou výškou < 0	
Studenější vzduch oproti MSA	QFF < QNH
Teplejší vzduch oproti MSA	QFF > QNH

Tlak vzduchu lze tedy přirovnat k zátěži, kterou vyvolá sloupec vzduchu nad daným povrchem. V praxi se používají ještě jiné dva druhy tlaku. Tím prvním je tlak s označením **QFE**, při jehož nastavení na výškoměr v letadle bude přístroj indikovat výšku nad letišťem. Při pojíždění na

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

zemi výškoměr ukazuje nulu, což je také způsob, kterým se dá QFE zjistit. Tento tlak se používal hlavně v době vyspívajícího dopravního letectví ve druhé polovině 20. století v mnoha zemích. V současnosti jej používá především starší generace plachtařů, ale má své místo i v dopravním letectví, zvláště na blízkém východě. Tam se používá v běžném provozu v kombinaci s QNH. [25]

Druhým z nich je tzv. **standardní tlak**, který se rovná přesně 1013,25 hPa. Je to tlak definovaný dle MSA. V mnohé literatuře se označuje zkratkou QNE, nicméně jedná se o chybné označení. Tato zkratka nepředstavuje daný tlak, nýbrž hodnotu, kterou ukazuje výškoměr, jenž je nastavený na standardní tlak. Používání standardního tlaku, stejně tak jako používání QNH je rozebráno v následující kapitole. [26]

3.2 Práce s tlakem v letadle

Pro lepší orientaci v následující problematice je nutné správně chápat pojem „výška“. V angličtině se totiž rozlišují dva pojmy, a sice *altitude* a *height*. Pojem *altitude* odkazuje na výšku nad mořem, zatímco *height* odkazuje na výšku nad terénem. Do českého jazyka se oba pojmy překládají pouze jako výška, proto je dobré, při četbě literatury zabývající se tímto tématem, brát na zřetel zmíněnou skutečnost.

V dnešní době se v drtivé většině světa dává přednost nastavování výškoměru na QNH. Následující postupy jsou vztaženy ke vzdušnému prostoru Evropy, konkrétní hodnoty jsou pak typické pro Českou republiku. Na zemi při pojiždění letadla, jenž má výškoměr nastavený na QNH, je indikována nadmořská výška. Toto nastavení zůstává i po vzletu, až do výšky 5000 ft. Ve výšce 5000 ft je tzv. **převodní výška**. V té pilot přenastaví výškoměr na standardní tlak, čímž se docílí toho, že všechna¹⁴ letadla letící nad převodní výškou mají výškoměr nastavený na stejný tlak. Všem je tedy indikována výška nad mořem, pokud by u hladiny moře byl tlak dle MSA. V reálu se skutečný tlak téměř vždy liší od toho standardního, z čehož vyplývá, že každému letadlu letícímu nad převodní výškou je ve většině případů indikována chybná výška. Toto ale nevádí, ba naopak, je to žádoucí. Nejde o to, že každé letadlo má mylnou informaci o výšce, nýbrž o to, aby všichni měli onu chybu výšky špatně stejně. V takovém případě je pak možné letadla vertikálně separovat a nezáleží, odkud letadlo vzletlo, ani jaký byl na daném letišti tlak. Výškoměr nastavený na standardní tlak zobrazuje *letové hladiny*

¹⁴ ne úplně všechna, viz. další část textu

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

(např. FL090, FL240 atd.). Pokud pilot hlásí, že letí v hladině 150, zároveň tím poskytuje informaci, že má výškoměr přestavený na standardní tlak. [25]

Jakmile letadlo přilétá do destinace, piloti musí během klesání přenastavit výškoměr na aktuální QNH daného letiště, jehož hodnotu obdrží od řízení letového provozu. Děje se tak v **převodní hladině**. Tou je v ČR FL070, FL060, popřípadě FL050 podle toho, jestli je QNH na daném území nad, nebo pod hodnotou 1013,15 hPa. Z logiky věci plyne, že převodní hladina musí být tedy výš nebo rovna převodní výšce. Mezi piloty se vedou diskuze ohledně toho, zdali přenastavovat výškoměr už během klesání, nebo až při prolétávání převodní hladiny, to ale není předmětem této práce.

Během oblastních letů v nízkých výškách, především při VFR¹⁵ provozu v neřízeném prostoru, pilot zpravidla nastavuje na výškoměr **regionální QNH**, což je předpokládaný nejnižší tlak ve vymezené oblasti. Tím je zaručeno, že pilot bude mít indikaci, která bude buď správná anebo bezpečnější například vzhledem k vysokým překážkám.

3.3 METAR a ATIS

Slovo **METAR** je zkratkou slov **M**eteorological **A**erodrome **R**eport. Jedná se o pravidelná hlášení aktuálních meteorologických informací používané v letectví. Zprávu METAR vydávají meteorologické stanice umístěny na letištích každou hodinu, na frekventovanějších letištích i dvakrát za hodinu. V ČR tyto zprávy vychází v nulté a třicáté minutě, jsou ale státy, které vydávají ve dvacáté a padesáté minutě. Pokud se počasí změní natolik, že by to mohlo ohrozit bezpečnost letového provozu (jsou vymezeny přesné limity), vydává se zpráva **SPECI**. To funguje jako jakési upozornění pro pilota, který porovnáním zprávy SPECI a předchozího METARu zjistí, co se na daném letišti změnilo, a tyto okolnosti bere v potaz při plánování další činnosti.

METAR

METAR LKMT 291330Z 25008KT CAVOK 26/16 Q1013 NOSIG RMK REG QNH 1011=

Obrázek 14: Příklad zprávy METAR [27]

Jak je patrné z *Obr. 14*, zpráva METAR obsahuje velké množství informací od kódu letiště, přes vítr, mraky, teplotu až po rosný bod. Čtením METARu se zabývá nemalé množství prací, proto jsou v následujících větách rozebrány pouze části odkazující na tlak vzduchu. Ve zprávě

¹⁵ pravidla pro let za viditelnosti (opak let podle přístrojů)

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

na zmíněném obrázku je uvedeno *Q1013*, což čtenáře informuje o QNH 1013 hPa. Dle předpisu L3 Meteorologie se do zprávy udává aktuální tlak QNH v okamžiku sestavování zprávy. Hodnota tohoto tlaku musí být vypočtena na desetiny hektopascalů. Pokud by se hodnota nevešla do formy zápisu dané zprávy (v tomto případě 4 znaky), musí být zaokrouhlena na nejbližší celý nižší hektopascal. Musí být uvedena také jednotka – pro hektopascalů **Q**, pro palce rtuťového sloupce **A**. Poslední tři sady znaků *REG QNH 1011* odkazují na regionální QNH, které bylo rozebráno v předchozím odstavci. To, na rozdíl od aktuálního QNH, ve zprávě METAR být nemusí.

Převážně na řízených letištích se při odletech a příletech lze setkat se zprávou **ATIS**. Jedná se opět o zkratku, tentokrát ze slov **A**utomatic **T**erminal **I**nformation **S**ervice, v překladu automatická informační služba koncové řízené oblasti. Je to druh zprávy, který poskytuje pilotům informace o aktuálních podmínkách na letišti. ATIS má za úkol snížit zahlcení hlasové komunikace a ulehčit práci řídicím letového provozu, kteří nemusí každému letadlu sdělovat podmínky na letišti zvlášť. Piloti si jednoduše naladí příslušnou frekvenci daného ATISu a odposlechnou nahranou smyčku, součástí které je mimo jiné i zpráva METAR. S tím souvisí také aktualizace každých 30 minut.

Níže je uveden příklad zprávy ATIS z letiště Praha Ruzyně:

„Good morning Ruzyně ATIS information Quebec, 1000, ILS approach, runway in use 24, transition level 50. METAR Praha issued at 1000, wind 070 degrees 4 knots, visibility 10 kilometers or more, broken 3 thousand 6 hundred feet, temperature 11, dewpoint 3, QNH 1022 hektopascals, NOSIG. You have received ATIS information Quebec.“ [28]

Jak je z příkladu patrné, ATIS bývá standardně publikován v anglickém jazyce. Kromě METARU zahrnuje i další informace jako například dráhu v používání nebo právě převodní hladinu. Každá zpráva ATIS začíná a končí jiným¹⁶ písmenem z ICAO hláskovací abecedy. Pilot její odposlechnutí potvrdí příslušným písmenem a hodnotou QNH. Potvrzení přijetí zprávy ve zmíněném příkladě pro letadlo s imatrikulací *OK-ABC* stanici *Praha Radar* by vypadalo následovně:

Praha Radar, OK-ABC, information Quebec, QNH 1022...

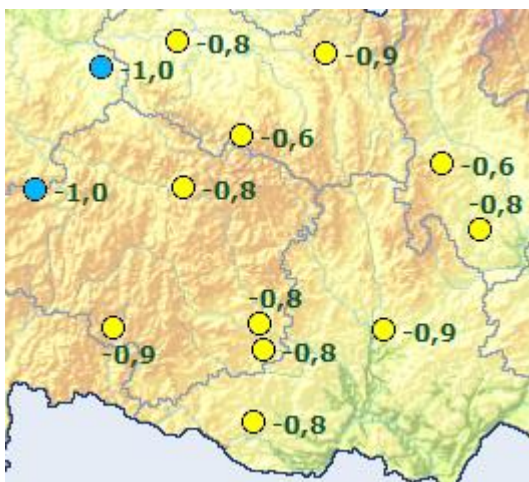
¹⁶ dvě po sobě jdoucí zprávy nemají stejné označení

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

4 Předpověď tlaku vzduchu

O předpovídání tlaku vzduchu byla do jisté míry zmínka v teoretické části této práce. Jednalo se o formu předpovědi s použitím barografu, který vykresloval průběh tlaku vzduchu, z něhož bylo možné odvodit tlakovou tendenci. V dnešní době lze rozlišit v podstatě dva základní druhy předpovědi, které spolu ale do jisté míry souvisí.

Tím relativně méně přesným je předpovídání v souvislosti se znalostí průběhu tlakové tendence. Je využíván ten samý princip jako u barografu. Na základě znalosti tlakové tendence lze přičíst tuto hodnotu k aktuálnímu naměřenému tlaku na letišti, tím je možné určit předpokládaný tlak v nejbližších hodinách. Na *Obr. 15* je znázorněna mapa s tlakovou tendencí v jednotkách hPa. Žlutá barva znamená změnu blízko průměru v dané oblasti, modrá barva značí maximální pokles.



Obrázek 15: Tlaková tendence [29]

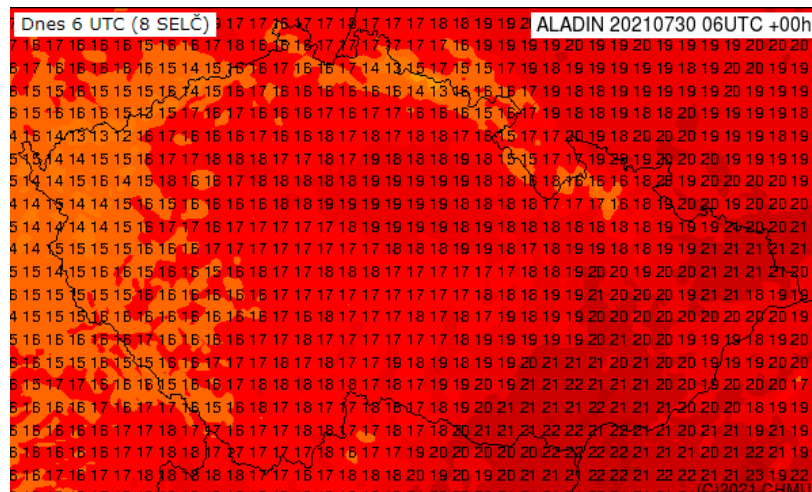
Modernějším, složitějším a podstatně přesnějším způsobem je předpovídání na základě matematického modelu. Těch je v dnešní době již celá řada od různých firem. V této práci jsou použita data z modelu Aladin, proto je jako příklad uveden právě tento model.

Model **ALADIN** vyvinula francouzská společnost Météo–France název je zkratkou slov **A**ire **L**imitée **A**daptation **D**ynamique, **D**evelopment **I**nternational. Je to model, který je určen pro krátkodobou předpověď. Ve středisku ve Francii se vypočte globální model AGRÉPE a jeho výsledky se přenesou do jednotlivých členských zemí. Kromě ČR patří mezi členské

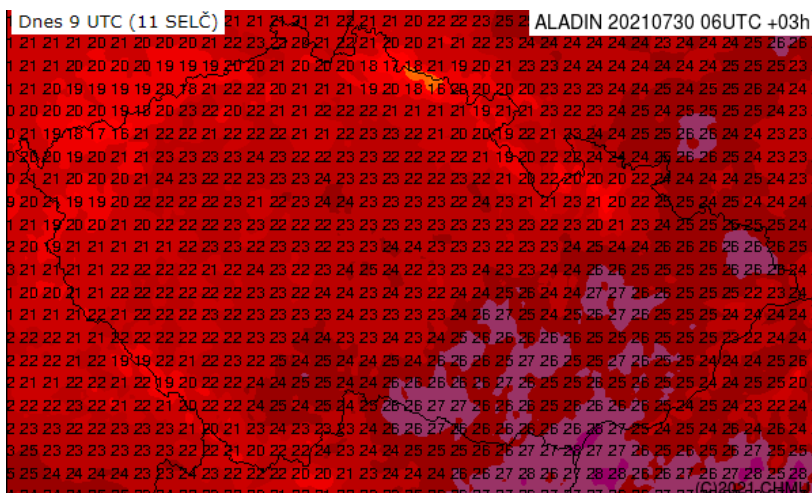
KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

země také Belgie, Portugalsko, Polsko a další evropské, ale i některé severoafrické státy. Globální výsledky se přenesou do jednotlivých států, kde jsou pak pomocí modelu ALADIN zpřesňovány pro dané území. Přesnost modelu AGRÉPE je 15 km, rozlišení ALADIN počítané v ČHMÚ bylo do roku 2019 v horizontálním směru 4,7 km a v současnosti je krok 2,3 km. Této změny bylo možné dosáhnout mimo jiné i díky zapojení nového superpočítače, který jednak počítá na hustší síti bodů a jednak využívá k výpočtu složitější metody. Data z modelu jsou aktualizována každých 6 hodin, přičemž je poskytována předpověď až na 54 hodin. Mezi předpovídané hodnoty patří srážky, směr a rychlost větru, teplota ve 2 metrech nad zemí, oblačnost, ale i tlak. [30] [31]

Na Obr. 16 je uveden příklad numerického modelu ALADIN s aktuálními hodnotami teplot ve °C, Obr. 17 znázorňuje předpověď na 3 hodiny dopředu:



Obrázek 16: Model ALADIN 0600 [32]



Obrázek 17: Model ALADIN 0600 s předpovědí [32]

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

4.1 Předpověď modelu ALADIN

Hlavním cílem této práce je porovnat předpovězené hodnoty tlaku vzduchu na základě modelu ALADIN s reálnými naměřenými hodnotami na daných stanicích. Toto porovnání je provedeno pro čtyři letiště v ČR. Jedná se o Letiště Václava Havla v Praze (LKPR), Letiště Brno-Tuřany (LKTB), Letiště Leoše Janáčka Ostrava (LKMT) a Letiště Karlovy Vary (LKKV).

Metodika výpočtu byla provedena následujícím postupem. Jako vstupní data slouží předpovězená data modelu ALADIN pro 9., 10., 11., a 12. hodinu. Zmíněné časy byly domluveny s pracovníky ČHMÚ, kteří také poskytli ony data pro tuto práci. Na *Obr. 18* je uveden příklad vstupního vzorku z června 2020 s předpovědí na devátou hodinu.

STATION/PARAMETER	LONGITUDE	LATITUDE	CLSTEMPERATURE	SURFPRESSION	SURFGEOPOTENTIAL
LKPR	0.142665336E+002	0.501004436E+002	0.287605647E+003	0.978802376E+005	0.358923363E+004
LKTB	0.167009585E+002	0.491473704E+002	0.290005924E+003	0.992099087E+005	0.226533637E+004
LKMT	0.181140443E+002	0.496958371E+002	0.287222688E+003	0.989631877E+005	0.246146953E+004
LKKV	0.129094116E+002	0.501993474E+002	0.287168410E+003	0.953204402E+005	0.582515039E+004

Obrázek 18: Příklad vstupních dat [33]

Jednotlivé sloupce z *Obr. 18* zleva značí zeměpisnou délku a šířku, následuje teplota. Pro potřeby této práce byly použity poslední dvě hodnoty. Tou první je QFE daného letiště, tou druhou je geopotenciál. Ten byl důležitý k výpočtu modelové výšky, která se získala podílem geopotenciálu a tíhového zrychlení.

Výzkum je proveden pro období 2020–2021 pro šest měsíců v roce – dva letní (červen, červenec), dva zimní (prosinec, leden) a oba měsíce rovnodennosti (březen, září). Toto období bylo zvoleno z důvodu archivace přesnějších naměřených dat na jednotlivých letištích. Postup práce s daty je následující:

Pro každý den v měsíci byly sesbírány čtyři tlaky QFE, které byly pomocí barometrické rovnice přepočteny na tlak QNH. Z těchto čtyřech QNH byl vybrán nejnižší a byl porovnán s nejnižším QNH vypočteným na základě reálných hodnot naměřených na jednotlivých letištích. Metodika práce je znázorněna na *Obr. 19* a *Obr. 20*.

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

ROK	MĚSÍC	DEN	HODINA	LKPR	QFE_model	LKTB	QFE_model	LKMT	QFE_model	LKKV	QFE_model
2020	ČERVEN	1.	9		97880.24		99209.91		98963.19		95320.44
			10		97885.77		99195.55		98963		95318.06
			11		97886.64		99183.37		98968.85		95309.99
			12		97880.71		99177.9		98969.16		95308.68
		2.	9		97594.13		98841.9		98572.85		95078.13
			10		97568.85		98794.92		98531.23		95047.45
			11		97539.05		98761.31		98495.58		95003.38
			12		97493.35		98739.88		98483.08		94962.32
		3.	9		96530.77		98014.62		97766.1		94051.05
			10		96500.95		97926.64		97736.53		93999.65
			11		96466.32		97964.33		97721.6		93943.42
			12		96426.1		97921.72		97699.98		93880.65
		4.	9		95613.45		97290.14		97132.17		93018.44
			10		95579.99		97257.01		97107.03		93007.05
			11		95556.54		97204.02		97067.29		92993.13
			12		95543.24		97162.28		97019.16		93039.43
		5.	9		95456.02		97109.41		96794.9		92954.92
			10		95530.06		97130.02		96817.99		93005.55
			11		95570.56		97155.71		96844.7		93011.02
			12		95565.62		97202.04		96866.73		92987.71

Obrázek 18: Metodika práce s daty 1 [33]

LKPR	QNH_model	QNH_model_min	QNH_real_min	LKTB	QNH_model	QNH_model_min	QNH_real_min	LKMT	QNH_model	QNH_model_min	QNH_real_min	LKKV	QNH_model	QNH_model_min	QNH_real_min
1.	102323.5452	102323	102168	1.	102024.704	101991	101891	1.	102018.5001	102018	101913	1.	102460.9743	102448	102286
	102329.3262				102009.936				102018.3042				102458.416		
	102330.2357				101997.411				102024.3348				102449.7415		
	102324.0365				101991.786				102024.6544				102448.3334		
2.	0			2.	0			2.	0			2.	0		
	102024.4472	101919	101815		101646.253	101541	101471		101616.109	101523	101493		102200.5127	102076	101916
	101998.0196				101597.94				101573.2041				102167.5344		
	101966.8668				101563.376				101536.4534				102120.1631		
	101919.0922				101541.338				101523.5675				102076.0273		
3.	0			3.	0			3.	0			3.	0		
	100912.8156	100803	100686		100795.501	100699	100632		100784.4521	100716	100673		101096.4933	100913	100792
	100881.6419				100705.025				100753.9691				101041.2428		
	100845.4399				100743.784				100738.5782				100980.8006		
	100803.3941				100699.965				100716.2907				100913.3284		
4.	0			4.	0			4.	0			4.	0		
	99953.85354	99880	99775		100050.466	99918	99906		100130.9506	100014	99946		99986.52957	99959	99805
	99918.87461				100016.396				100105.0345				99974.28633		
	99894.36009				99961.9025				100064.0676				99959.32358		
	99880.45634				99918.9782				100014.4516				100009.0919		
5.	0			5.	0			5.	0			5.	0		
	99789.27696	99789	99723		99864.6082	99864	99803		99783.26802	99783	99710		99918.25123	99918	99805
	99866.67803				99885.8029				99807.07088				99972.67397		
	99909.01654				99912.2218				99834.6055				99978.55373		
	99903.85228				99959.8663				99857.31564				99953.49756		
6.	0			6.	0			6.	0			6.	0		
	100680.7483	100680	100510		100839.124	100807	100735		100822.9964	100822	100704		100654.5974	100654	100442
	100701.8443				100837.294				100837.2018				100690.4564		
	100732.903				100830.178				100845.088				100700.7003		

Obrázek 19: Metodika práce s daty 2 [33]

QNH bylo vypočítáno s přesností na setiny pascalů následně zaokrouhleno na nejbližší celý nižší pascal a porovnáno reálným QNH zaokrouhleným stejně tak. Tato reálná data byla taktéž poskytnuta od pracovníků ČHMÚ.

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

4.2 Výsledky

Pro kompletaci výsledků byl využit program Microsoft Excel v. 2019, statistické testy byly provedeny v aplikaci MATLAB R2020a.

Nejprve bylo zkoumáno, zda rozdíly modelu a naměřených hodnot mají normální rozdělení. Narušení normality by signalizovalo, že model nějakou relativní veličinu opomíjí. Hypotéza o normalitě rozdílových dat byla testována Andersonovým – Darlingovým testem. P-hodnota vyšla ve všech případech kromě jednoho (březen LKKV) **0**. Na hladině významnosti 5 % tedy hypotéza zamítnuta nebyla. Nebyla prokázána existence nějaké relativní veličiny, kterou by model opomíjel.

Další řešenou otázkou bylo, zdali model v průměru odhaduje správně, nebo jestli systematicky podhodnocuje, popř. nadhodnocuje. Pomocí t-testu byla testována hypotéza, že střední hodnota rozdílových dat je rovna nule. P-hodnota ve všech případech vyšla 1. Na hladině významnosti 5 % byla tedy hypotéza zamítnuta. Bylo zjištěno, že střední hodnota předpovídaných dat je vyšší než střední hodnota naměřených dat. U všech měsíců je v grafech vypsán jejich průměrný rozdíl. *Obr. 20* znázorňuje oba testy.

```
>> ROZDIL = MODEL - REAL;  
>> ttest(ROZDIL)  
  
ans =  
  
1  
  
>> adtest(ROZDIL)  
  
ans =  
  
logical  
  
0
```

*Obrázek 20: Statistické testy
v MATLABu [33]*

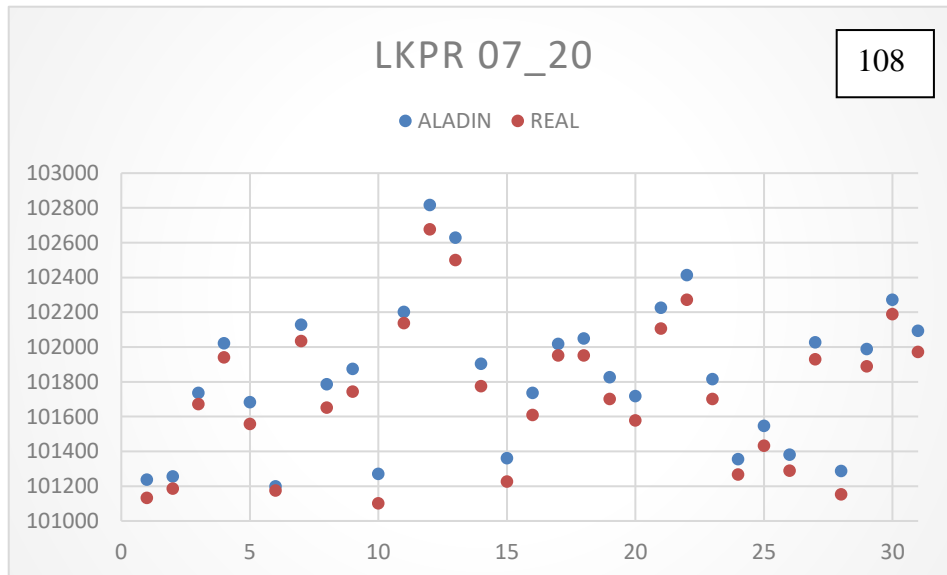
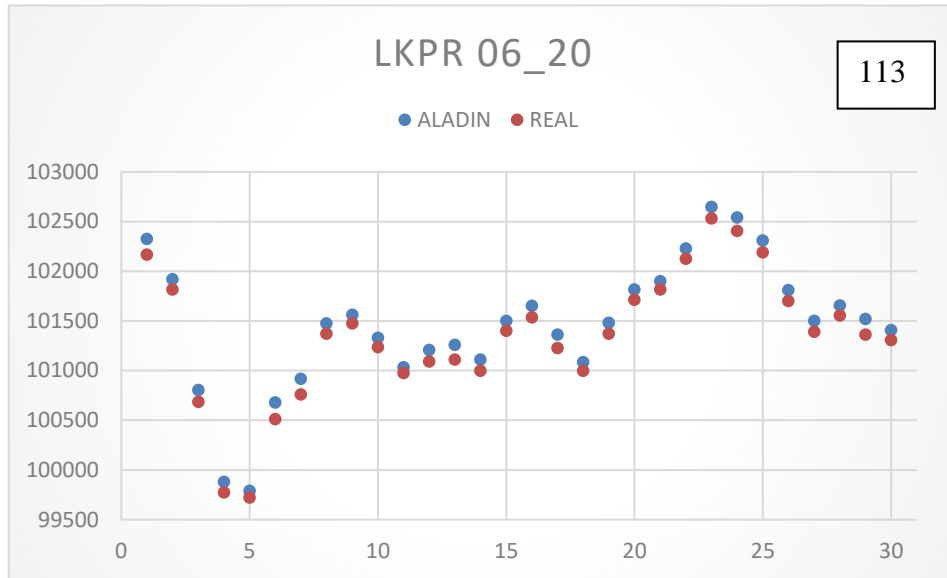
V následujícím textu jsou výsledky praktické části zobrazeny v grafech. Na ose y jsou hodnoty v jednotkách pascalů, osa x představuje jednotlivé dny v měsíci. Výsledky jsou rozříděny pro každé letiště chronologicky od června 2020 po březen 2021. Veškeré podklady pro vý-

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

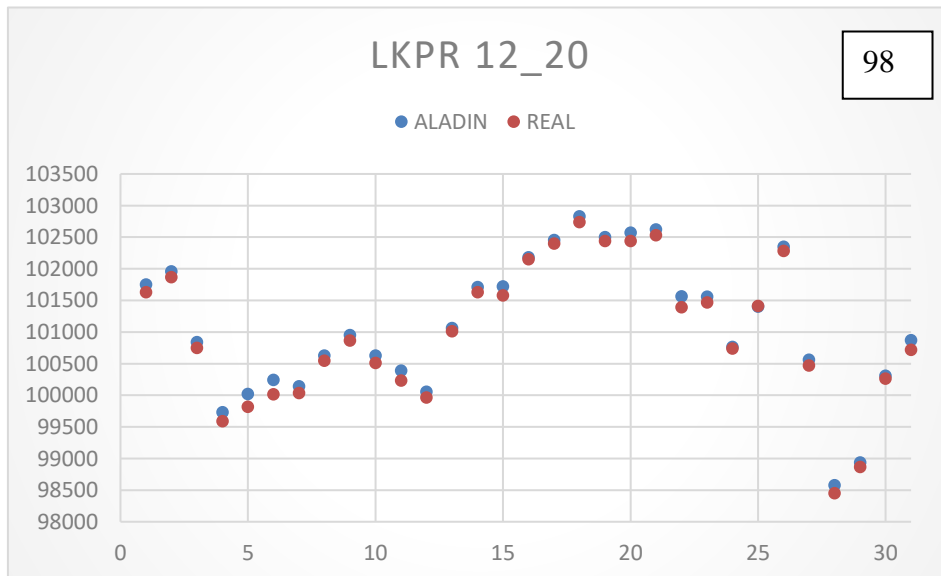
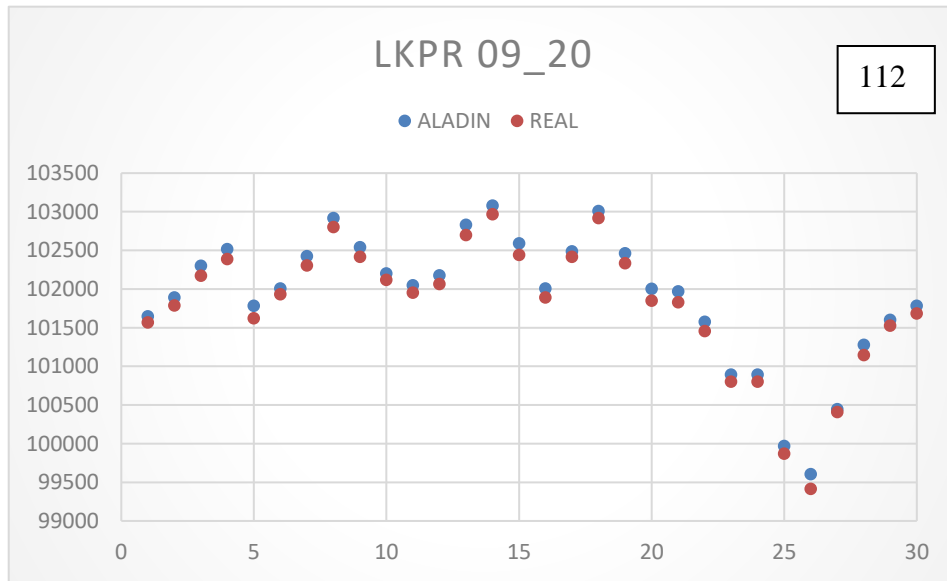
sledky jsou uvedeny v příloze této práce. Průměrný rozdíl matice předpovědi a matice naměřených hodnot zaokrouhlených na jednotky pascalů je vypsán v pravém horním rohu každého grafu. Všechny grafy pochází z autorovy tvorby na podkladech dat z ČHMÚ, z toho důvodu nejsou ozdrojovány jednotlivě.

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

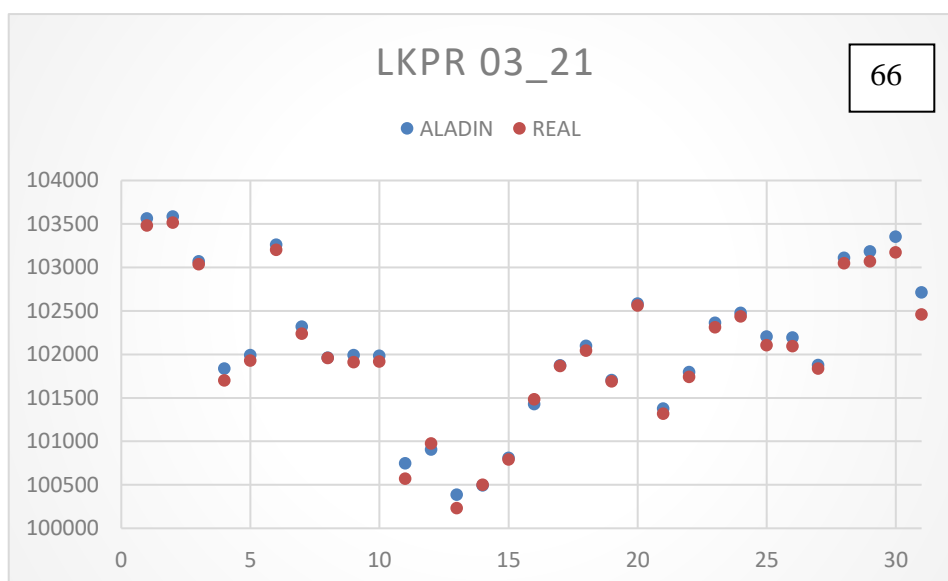
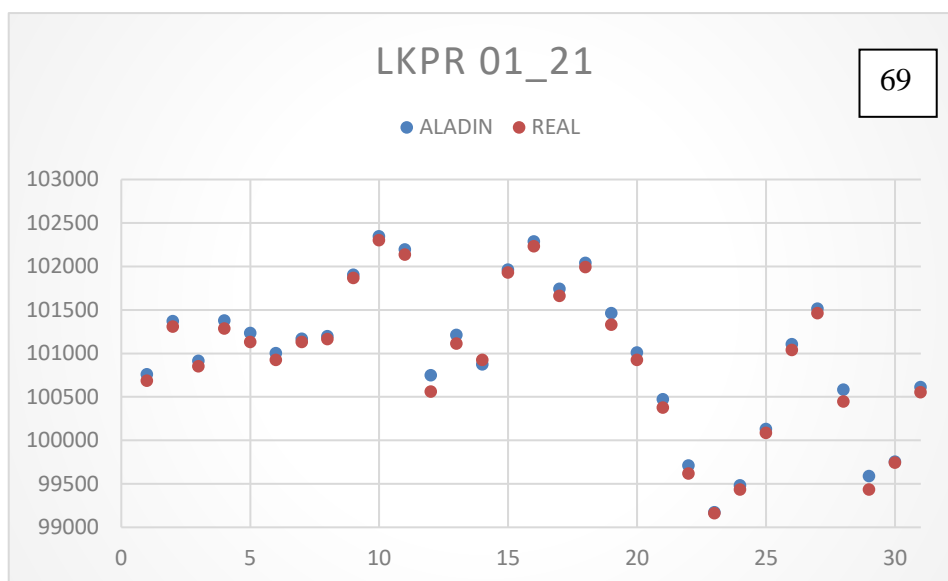
4.2.1 LKPR



KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST



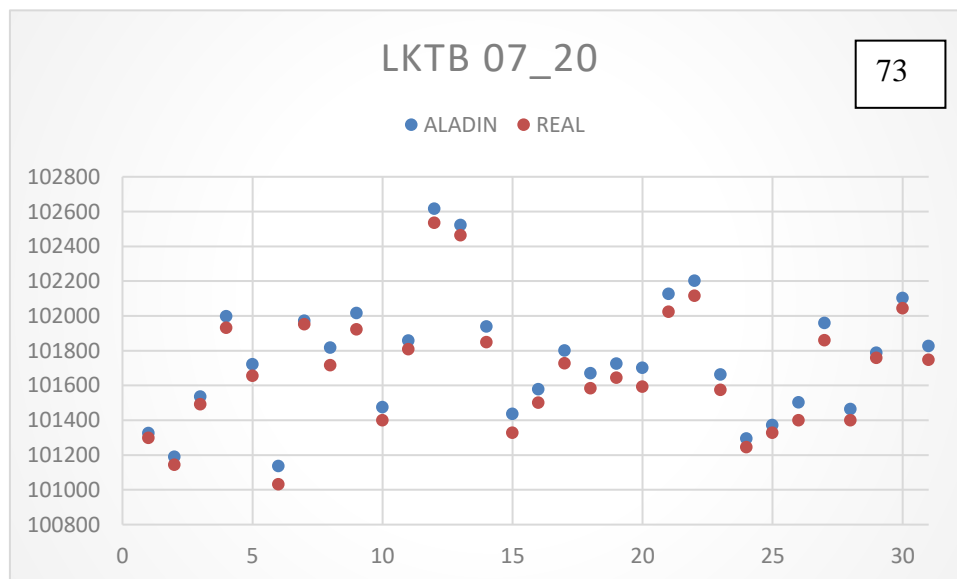
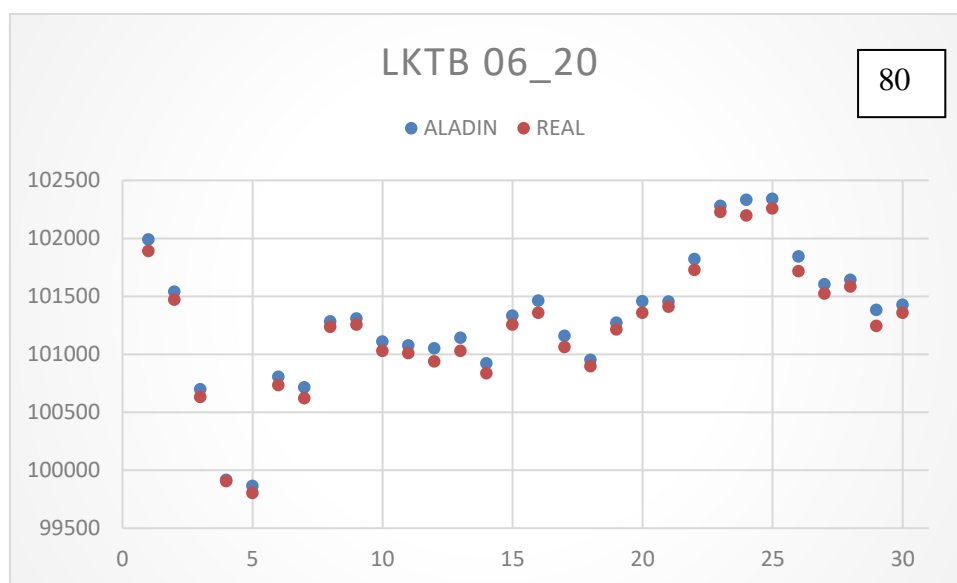
KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST



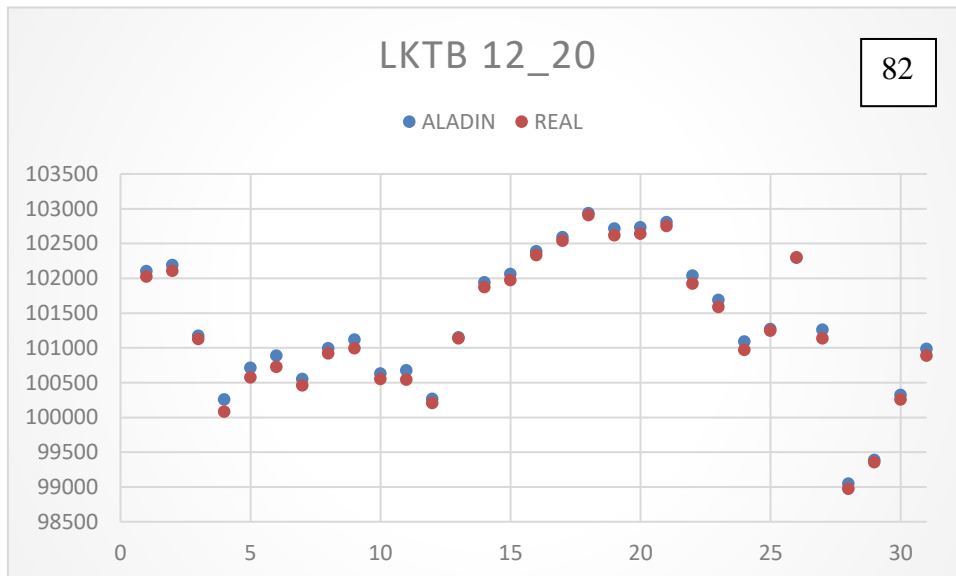
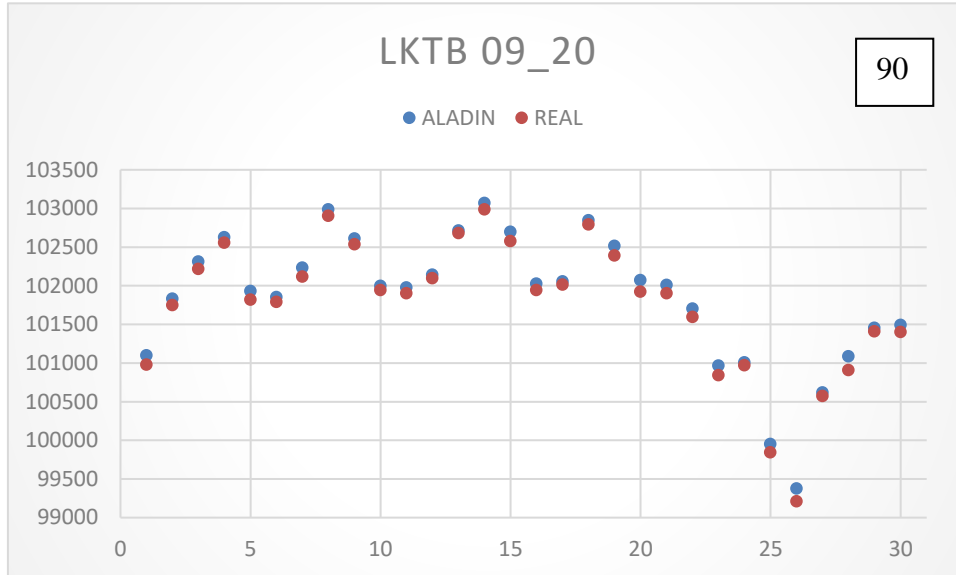
Průměrný rozdíl pro LKPR za všech 6 měsíců je 94,35 pascalů. Nejúspěšnější měsíc březen s rozdílem 66,16 pascalů. Nejméně úspěšný červen s rozdílem 112,93 pascalů.

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

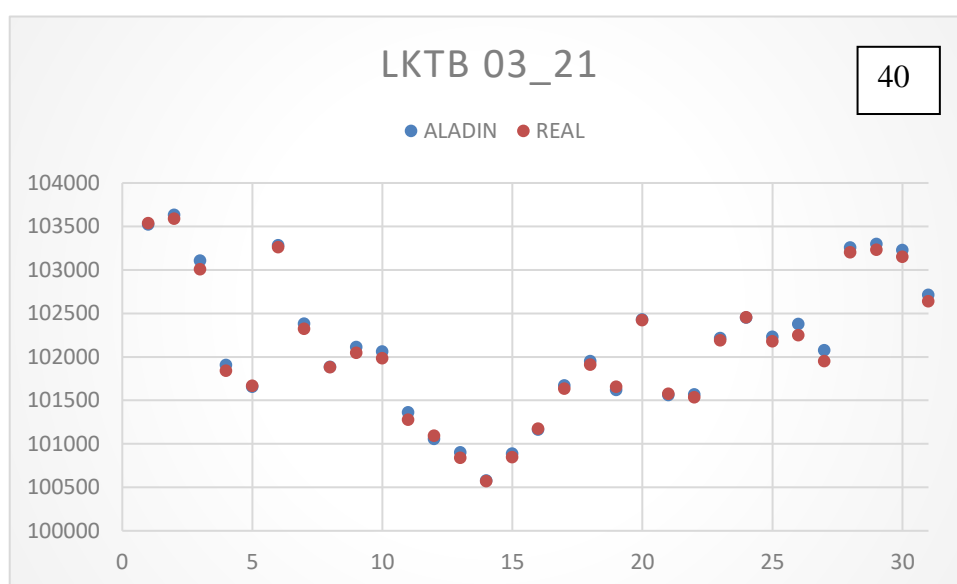
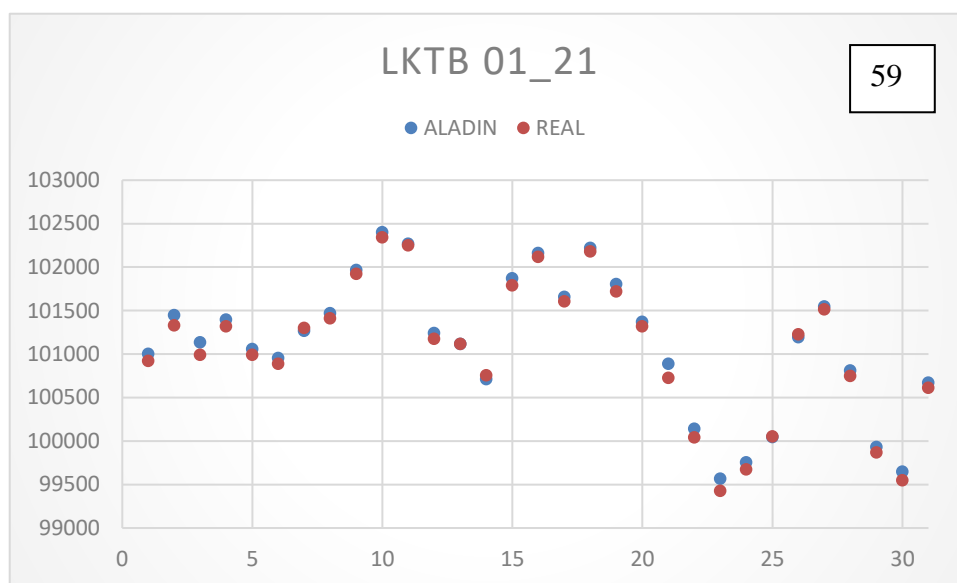
4.2.2 LKTB



KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST



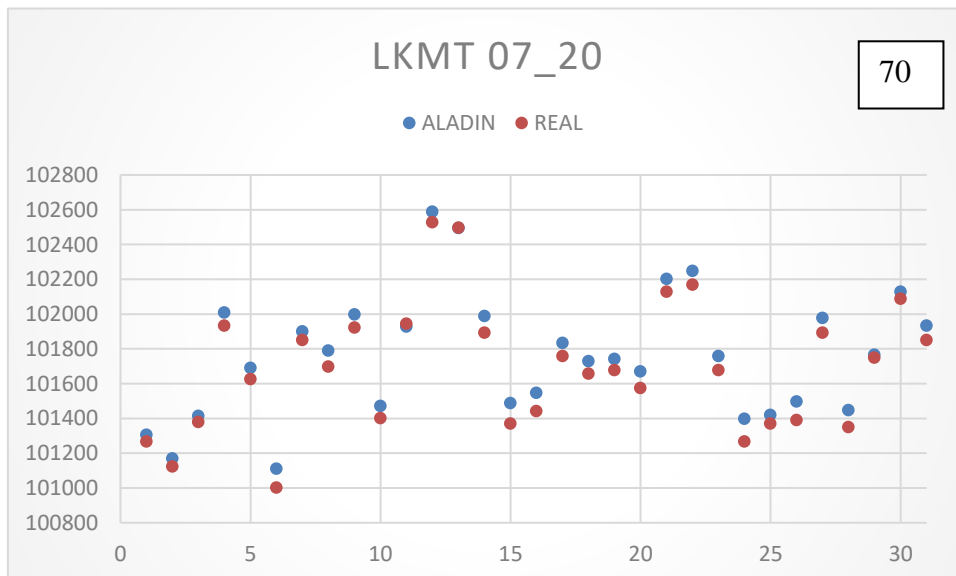
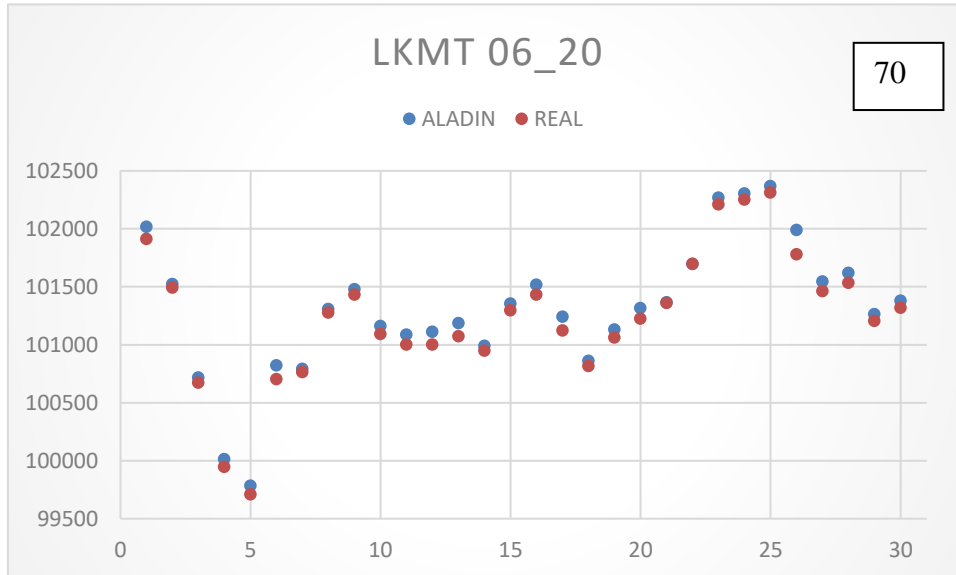
KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST



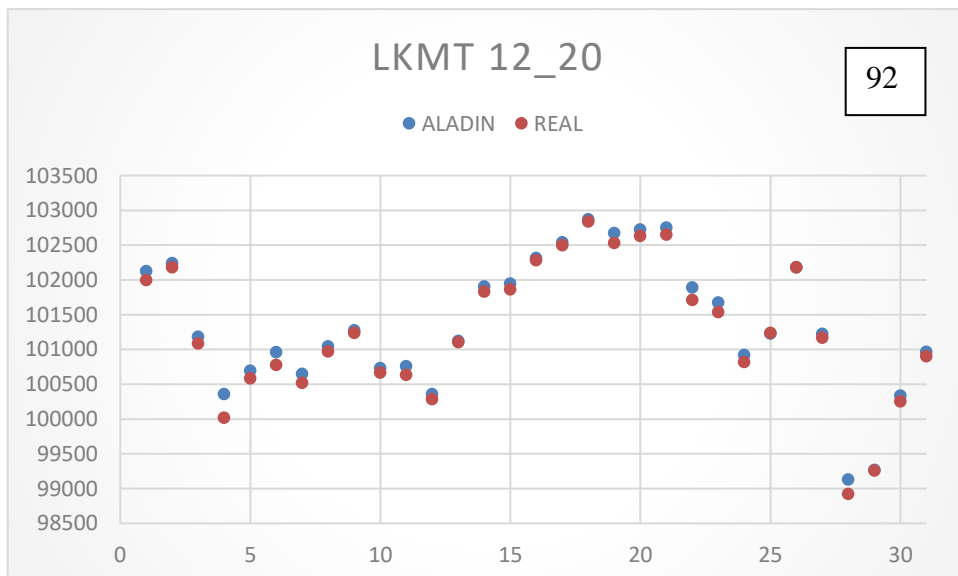
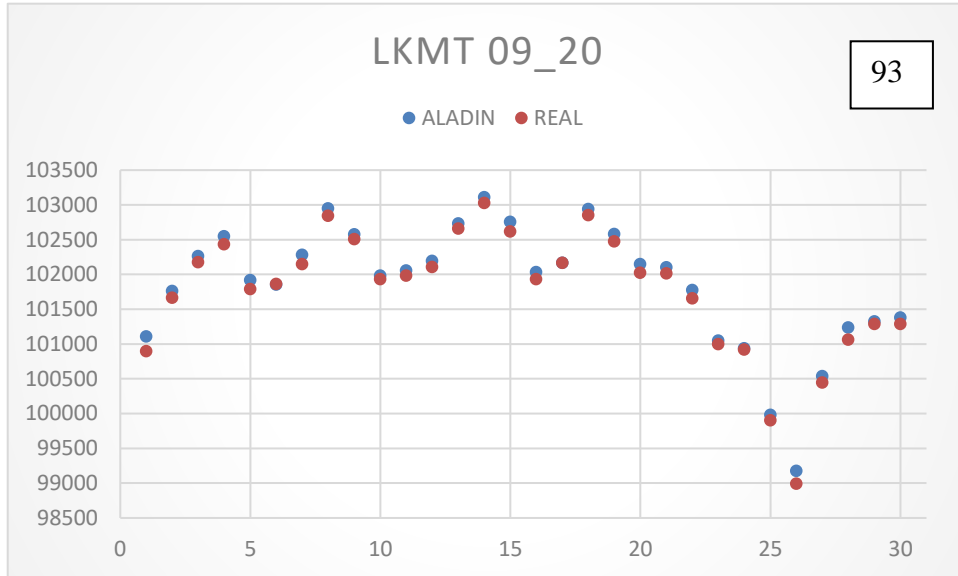
Průměrný rozdíl pro LKTB za všech 6 měsíců je 70,47 pascalů. Nejúspěšnější měsíc březen s rozdílem 39,65 pascalů. Nejméně úspěšný červen s rozdílem 79,93 pascalů.

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

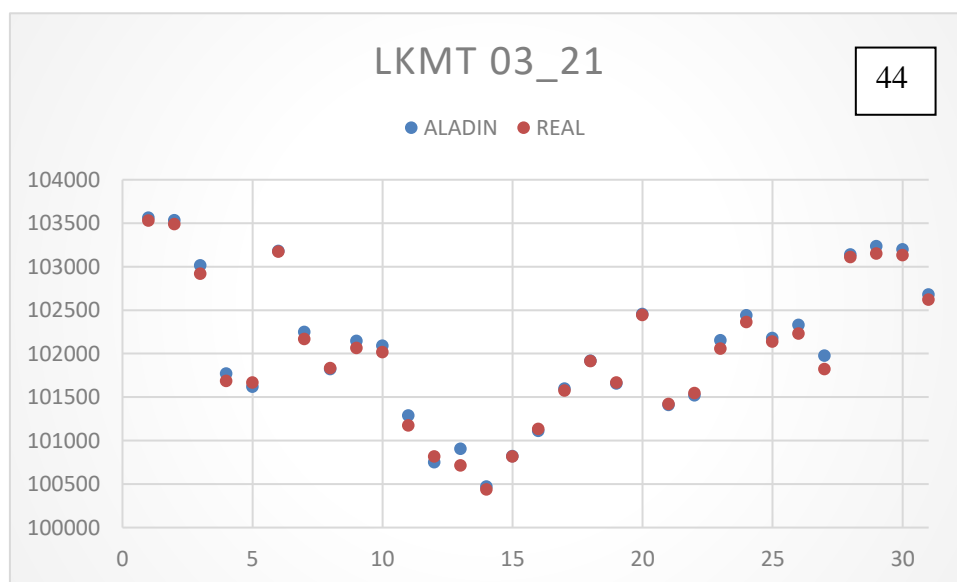
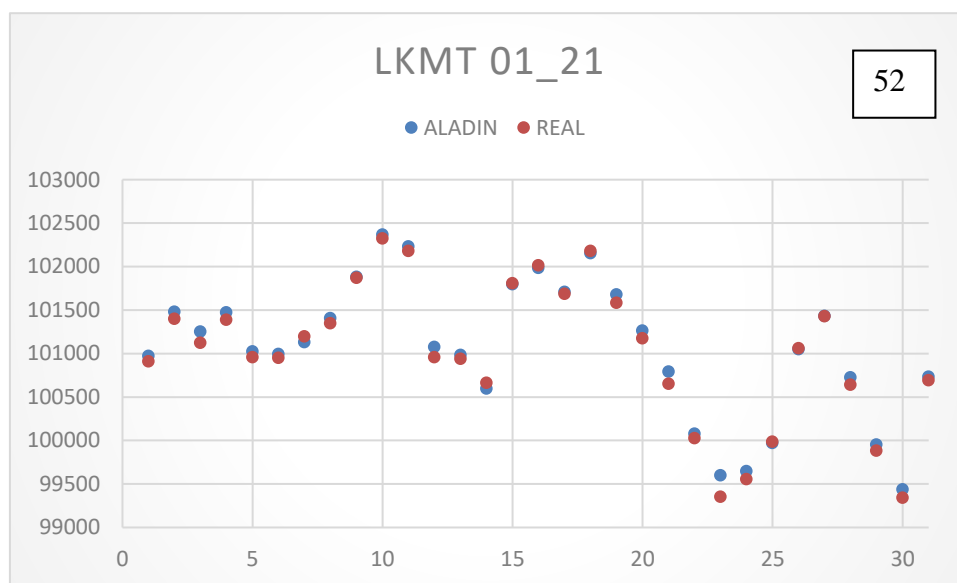
4.2.3 LKMT



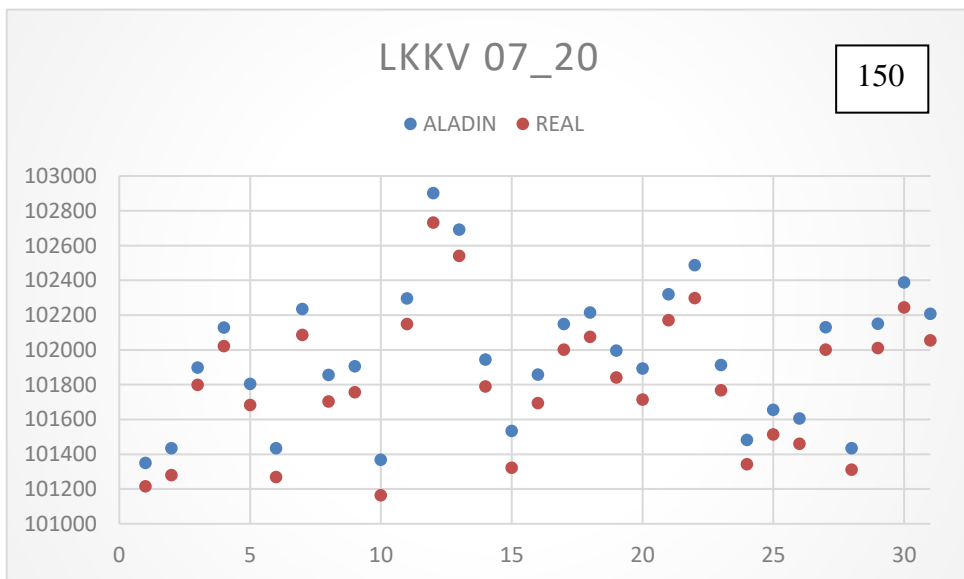
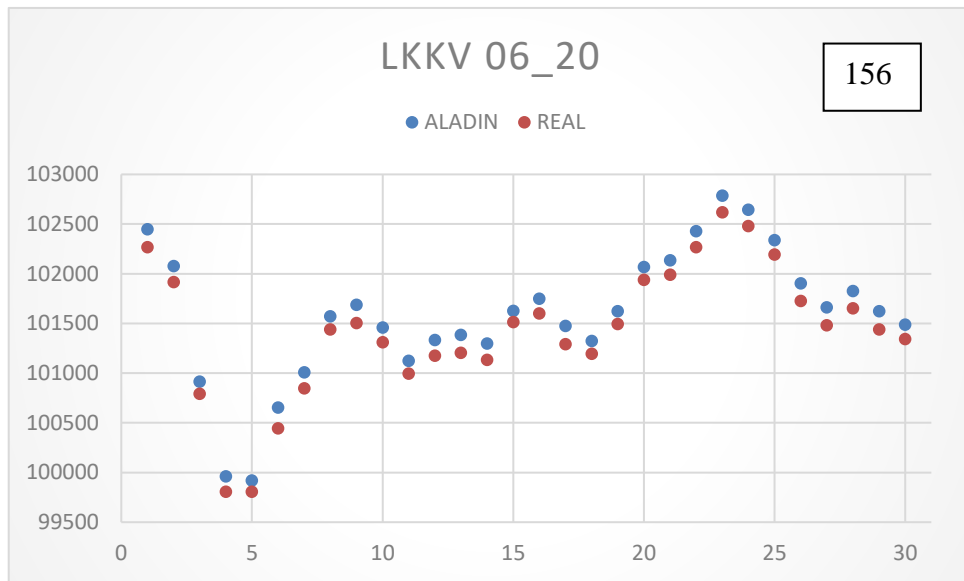
KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST



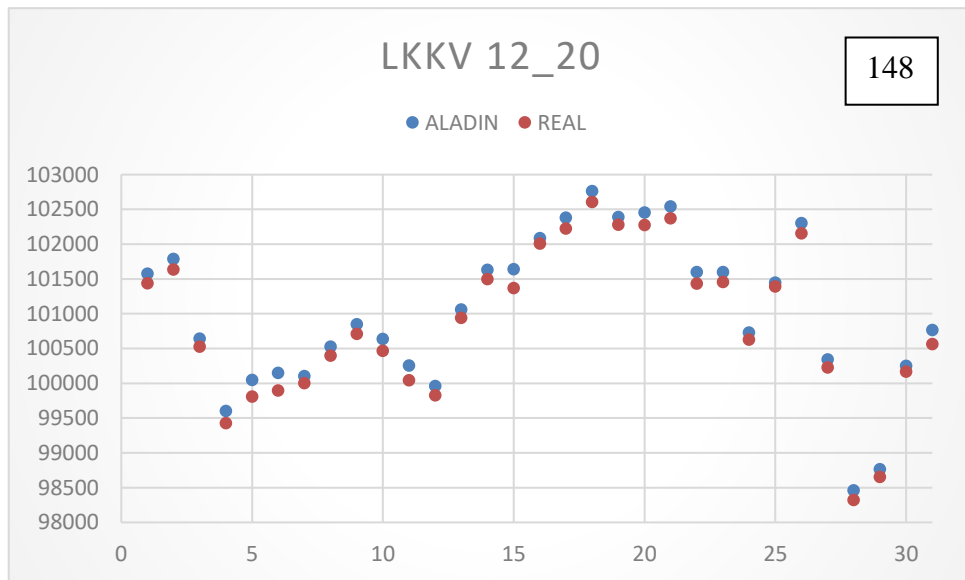
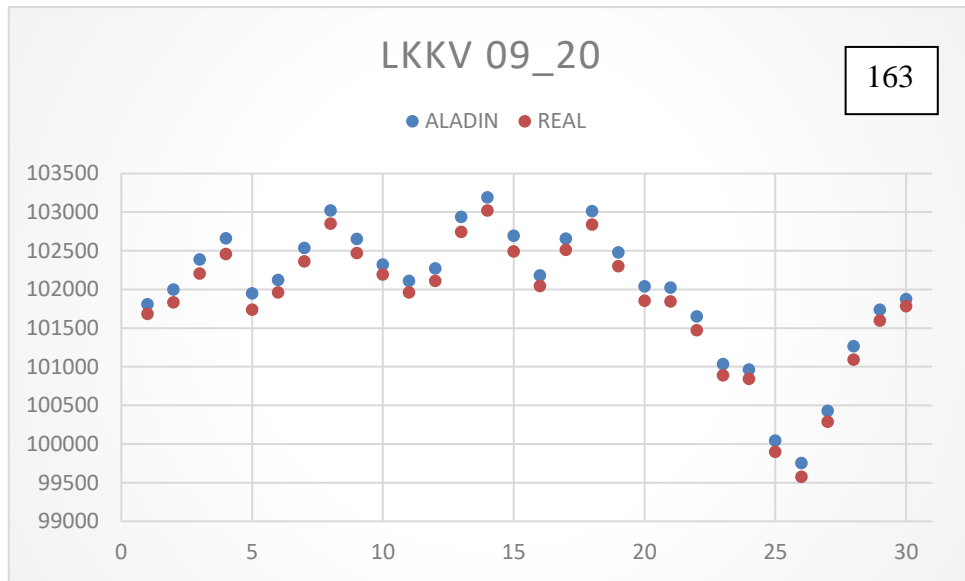
KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST



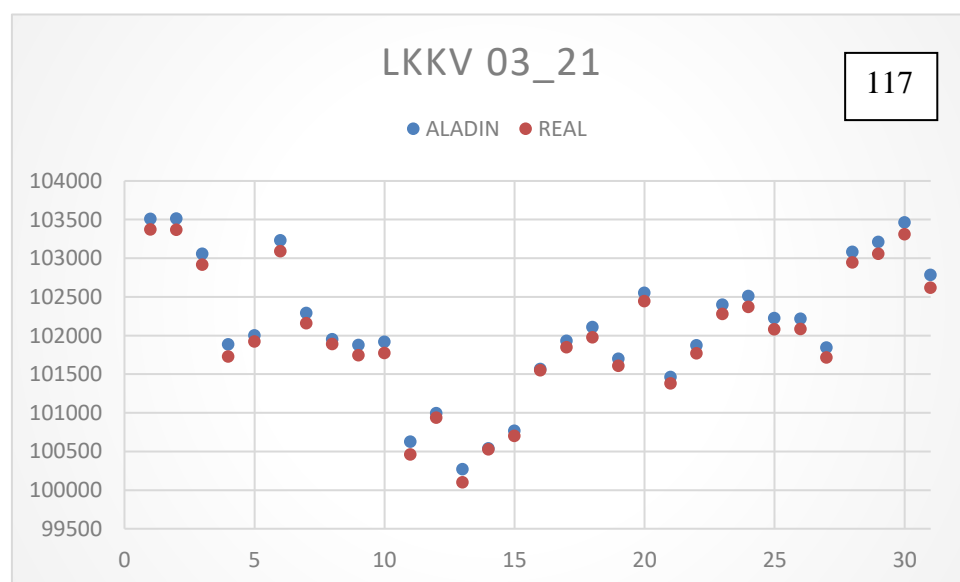
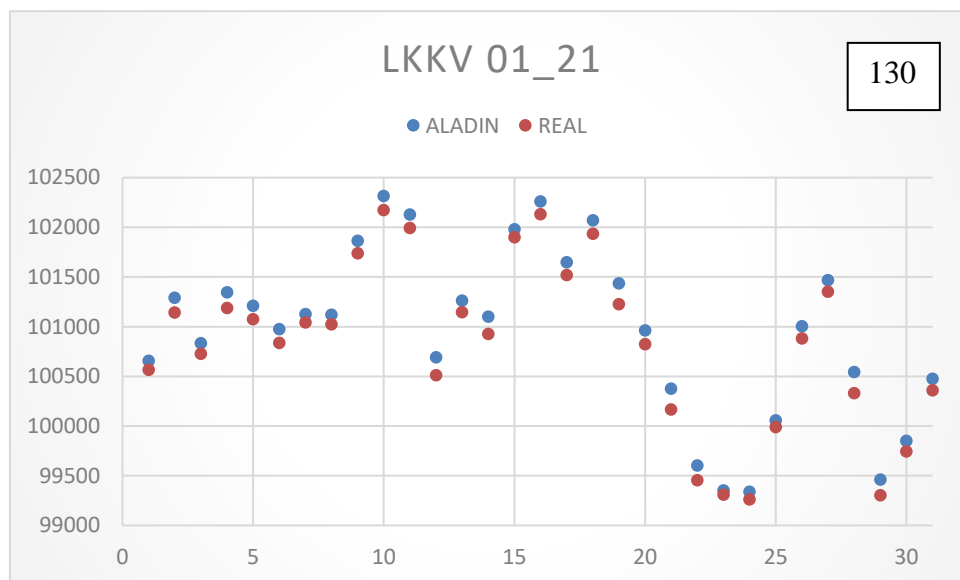
Průměrný rozdíl pro LKMT za všech 6 měsíců je 70,14 pascalů. Nejúspěšnější měsíc březen s rozdílem 44,2 pascalů. Nejméně úspěšné září s rozdílem 91,81 pascalů.

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST**4.2.4 LKKV**

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST



KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST



Průměrný rozdíl pro LKKV za všech 6 měsíců je 143,79 pascalů. Nejúspěšnější měsíc březen s rozdílem 116,87 pascalů. Nejméně úspěšné září s rozdílem 162,47 pascalů.

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

4.2.5 Zhodnocení

Z výsledků je patrné, že data z modelu jsou mírně nadhodnocena. Jedná se o tzv. soustavnou chybu (angl. bias). Nejideálnější by bylo mít bias co nejbližší nule, nicméně dosáhnout toho u všech předpovídaných prvků, ještě k tomu ve všech hladinách, je nereálné. V takovém případě by se jednalo o perfektní model. Příčiny kladného biasu je dle pracovníků ČHMÚ velmi obtížné určit, protože předpověď pole hmoty závisí na kombinaci předpovědi řady fyzikálních procesů v atmosféře, které spolu vzájemně interagují. Vedle soustavné chyby je další důležitou charakteristikou tzv. náhodná chyba (angl. standard deviation). Mohou nastat situace, kdy bude soustavná chyba téměř nulová, ale náhodná chyba velká a obráceně.

Z výsledků získaných výzkumem této práce je patrné, že model ALADIN pro předpověď tlaku má relativně malou náhodnou chybu a nějakou soustavnou chybu, která též není velká. Méně přesné byly předpovědi pro letní měsíce, tam nastávaly situace, kdy model ani jednou nepředpověděl hodnoty menší, než které byly naměřené. V zimních měsících, a zvláště v březnu, už byl výskyt tohoto jevu hojnější. Zajímavostí může být skutečnost, že pokud byla předpovězena nižší hodnota, zpravidla se tak stalo na více letištích v tom samém dni. V jednom jediném případě při všech 736 porovnáních byla předpovězena zcela přesná hodnota (paradoxně 22. červen LKMT). Pro kompletní souhrny je možné nahlédnout do excelovských sešitů, které jsou součástí příloh této práce.

Model už tak předpovídá relativně velmi přesně. Na základě subjektivního názoru autora by šlo možného zpřesnění teoreticky dosáhnout použitím ještě menších výřezů krajiny při výpočtech. Vzhledem k tomu, že se tyto pomyslné čtverce snižovaly nedávno (2019), je toto zpřesnění v blízké době nepravděpodobné. Další možnou variantou by bylo udělat tento výzkum pro delší časový úsek, například několikaletý, a udělat dlouhodobý průměr nadhodnocování pro jednotlivé stanice v daných částech roku. Z takto zjištěných dat by poté bylo možné získat koeficienty, které by se odečítaly od předpovězených hodnot, a tím by se snížila soustavná chyba modelu ALADIN.

KAPITOLA V

Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala tématem tlaku vzduchu. Mezi její cíle patřilo statisticky vyhodnotit úspěšnost modelu ALADIN porovnáním předpovězených a naměřených hodnot, definovat druhy tlaků a jejich využití v letectví a popsat možnosti předpovědi tlaku vzduchu se zaměřením na tlak QNH. Tyto cíle byly splněny. Následně byla na základě dosažených výsledků provedena diskuze, kde bylo naznačeno možné zpřesnění předpovědi tlaku vzduchu.

Práce byla rozdělena na teoretickou a praktickou část. Teoretická část sloužila k začlenění čtenáře do problematiky tlaku vzduchu. Byly zde zmíněny základní principy a zákonitosti, dále bylo popsáno měření tlaku vzduchu, jednak v minulosti, a jednak současnými moderními tlakoměry. V samostatné podkapitole byly vypsány celosvětové rekordy v měření tlaku vzduchu. Ve druhé polovině teoretické části byly popsány různé procesy související s tlakem vzduchu a jeho změnami. Byly popsány základní meteorologické procesy a tlakové útvary v atmosféře. Tato část čtenáři poskytla vhled mimo jiné i do využívání mezinárodní standardní atmosféry, se kterou se ve velkém pracovalo v praktické části.

Praktická část byla rozdělena na dvě části. První z nich byla orientována na letectví. Byly zde definovány druhy tlaku vzduchu a práci s nimi v kokpitu letadla, což je rutinní činnost každého pilota. Okrajově práce nahlédla i do problematiky meteorologických zpráv, které v sobě mimo jiné nesou informaci odkazující na tlak vzduchu. Druhá část praktické části shrnula výsledky

KAPITOLA V – ZÁVĚR

porovnání předpovědi modelu ALADIN a reálných naměřených hodnot. Byly zde popsány jednotlivé statistické testy a vůbec průběh celého výzkumu včetně vyhodnocení dosažených výsledků.

Autor věří, že práce čtenáři jednoduše poskytnou informace spojené s tlakem vzduchu, obohatí různými zajímavostmi z historie nebo třeba překvapí výsledky porovnávání, stejně tak, jako tomu bylo v jeho případě.

Literatura

- [1] DVOŘÁK, Petr. *Letecká meteorologie*. s. 70. Cheb: Svět křídel, 2017. ISBN 978-80-7573-014-5
- [2] BARTOŠÍK, Petr. *Zpátky do Evropy, zpátky k barům?* [online]. [cit. 2021-6-17]. Dostupné z: https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/53693.pdf
- [3] Tlak. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-6-17]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Tlak>
- [4] BUREŠ, Jiří. *Evangelista Torricelli* [online]. [cit. 2021-6-19]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/fyzici/torricelli.htm>
- [5] *Torricelliho pokus* [online]. [cit. 2021-6-28]. Dostupné z: <https://www.sszdrakarvina.cz/bunka/fy/01tlak/tlaktp.htm>
- [6] Horror vacui. *Ottův slovník naučný* [online]. [cit. 2021-6-28]. Dostupné z: <https://archive.org/details/ottvslovnknauni10otogooq/page/n650/mode/2up?view=theater>
- [7] Blaise Pascal. *Aktualne.cz* [online]. [cit. 2021-7-8]. Dostupné z: <https://www.aktualne.cz/wiki/kultura/blaise-pascal/r~eb5ccc640f7c11e5bcb60025900fea04/>
- [8] MARTINEK, Roman. *Měření tlaku* [online]. [cit. 2021-7-9]. Dostupné z: http://352lab.vsb.cz/Podklady/01_Senzory/tlak.html
- [9] *Měření tlaku* [online]. [cit. 2021-7-11]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/amp/6229465-Rozdeleni-podle-velikosti.html>

-
- [10] *Tlakoměry kapalinové* [online]. [cit. 2021-7-11]. Dostupné z: http://www.e-automatizace.cz/ebooks/mmv/tlak/tlak_tlakomery_kapalinove.htm
- [11] *Aneroid Barometer* [online]. [cit. 2021-7-13]. Dostupné z: <https://pixels.com/featured/3-aneroid-barometer-science-photo-library.html>
- [12] FORESMAN, Pearson Scott. Altimeter diagram. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-7-13]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Aneroid#/media/Soubor:Altimeter_diagram_\(PSF\).png](https://cs.wikipedia.org/wiki/Aneroid#/media/Soubor:Altimeter_diagram_(PSF).png)
- [13] What is barograf. *Netinbag: Science* [online]. [cit. 2021-7-14]. Dostupné z: <https://www.netinbag.com/cs/science/what-is-a-barograph.html>
- [14] Letecký barograf Richard. *Vojenský historický ústav Praha* [online]. [cit. 2021-7-14]. Dostupné z: <http://www.vhu.cz/exhibit/letecky-barograf-richard/>
- [15] *Rekordy počasí* [online]. [cit. 2021-7-14]. Dostupné z: <http://tom-pocasi.wz.cz/odkazy/rekordypocasi.html>
- [16] DVOŘÁK, Petr. *Letecká meteorologie 2017*. s. 29–33. Cheb: Svět křídel, 2017. ISBN 978-80-7573-014-5.
- [17] SPIT. Standardní atmosféra. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-7-15]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Standardn%C3%AD_atmosf%C3%A9ra
- [18] *Útvar tlakový*. Elektronický meteorologický slovník. *Česká meteorologická společnost* [online]. [cit. 2021-7-19]. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz/heslo/4182>
- [19] DVOŘÁK, Petr. *Letecká meteorologie*. s. 294–301. Cheb. Svět křídel, 2017. ISBN 978-80-7573-014-5.
- [20] *Tlakové útvary* [online]. [cit. 2021-7-20]. Dostupné z: <https://www.kstst.sk/pages/vht/meteo/tlutvar.htm>
- [21] DVOŘÁK, Petr. *Letecká meteorologie*. s. 301–308. Cheb. Svět křídel, 2017. ISBN 978-80-7573-014-5.
- [22] [online]. [cit. 2021-7-23]. Dostupné z: <http://images.google.com>
- [23] Tlaková výše a níže, znáte rozdíly? *Počasicz.cz* [online]. [cit. 2021-7-26]. Dostupné z: <https://www.pocasicz.cz/aktuality-o-pocasi/aktuality-471/tlakova-vyse-a-nize-znate-rozdily-1338>

-
- [24] Všeobecná cirkulace atmosféry [online]. SlideToDoc [cit. 2021-7-23]. Dostupné z: <https://slidetodoc.com/veobecn-cirkulace-atmosfry-schma-veobecn-cirkulace-atmosfry-proudy/>
- [25] DVOŘÁK, Petr. *Letecká meteorologie*. s. 76–84. Cheb. Svět křídel, 2017. ISBN 978-80-7573-014-5.
- [26] FARLEX. QNE. *THE FREE DICTIONARY* [online]. [cit. 2021-7-27]. Dostupné z: <https://acronyms.thefreedictionary.com/QNE>
- [27] METAR LKMT. *Řízení letového provozu České republiky* [online]. [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: http://meteo.rlp.cz/LKMT_meteo.htm
- [28] Automatic Terminal Information Service. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Automatic_Terminal_Information_Service
- [29] Tlaková tendence. *Český hydrometeorologický ústav* [online]. [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/aktualni-situace/aktualni-stav-pocasi/ceska-republika/stanice/profesionalni-stanice/mapy/tlak-vzduchu#>
- [30] Předpovědní model počasí Aladin pro ČR je podrobnější. *Naše voda – informační portál o vodě* [online]. [cit. 2021-7-30]. Dostupné z: <https://www.nase-voda.cz/predpovedni-model-pocasi-aladin-pro-cr-je-podrobnejsi/>
- [31] ALADIN. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-7-30]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/ALADIN>
- [32] Předpovědi modelu Aladin. *Český hydrometeorologický ústav* [online]. [cit. 2021-7-30]. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/ov/aladin/results/ala.html#T2m?>
- [33] Data ČHMÚ dále zpracována autorem.

Seznam obrázků

- 1: Evangelista Torricelli [4]
- 2: Torricelliho pokus [5]
- 3: Diferenční U-tlakoměr [8]
- 4: Nádobkový tlakoměr [10]
- 5: Nádobkový tlakoměr se sklonným ramenem [10]
- 6: Aneroid [11]
- 7: Barometrický výškoměr [12]
- 8: Letecký barograf Richard [14]
- 9: Průběh teploty, tlaku a hustoty s rostoucí výškou [17]
- 10: Tlaková výše [20]
- 11: Tlaková níže [20]
- 12: Teplá a studená fronta [22]
- 13: Tlakové útvary [24]
- 14: Příklad zprávy METAR [27]
- 15: Tlaková tendence [29]
- 16: Model ALADIN 0600 [32]

17: Model ALADIN 0600 s předpovědí [32]

18: Metodika práce s daty 1 [33]

19: Metodika práce s daty 2 [33]

20: Statistické testy v MATLABu [33]

Seznam tabulek

- 1: Převodní tabulka jednotek tlaku [3]
- 2: Barický stupeň v závislosti na rostoucí výšce [16]
- 3: Vztah QFF a QNH [25]