

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

ÚSTAV LETECKÉ DOPRAVY



František Štemberk

Předpověď počasí pro letiště Hradec Králové

Bakalářská práce

2021



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

děkan

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



K621 **Ústav letecké dopravy**

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

František Štemberk

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 – PIL – Profesionální pilot

Název tématu (česky): **Předpověď počasí pro letiště Hradec Králové**

Název tématu (anglicky): Weather Forecast for Airport Hradec Králové

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je návrh optimální předpovědi počasí pro letiště Hradec Králové
- Popište dosavadní stav meteorologického zabezpečení na LKHK
- Proveďte sběr meteorologických dat pro LKHK v období leden - červen 2021
- Analyzujte dostupné předpovědi počasí pro LKHK
- Proveďte statistické porovnání předpovědních modelů a naměřených meteorologických dat
- Diskutujte zjištěné výsledky šetření a navrhněte optimální řešení předpovědi počasí pro LKHK



- 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
Oxford aviation academy: Meteorology
Letecký předpis L3, Meteorologie, MD ČR

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.

František Štemberk
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 9. října 2020



Poděkování

Autor práce by na tomto místě rád poděkoval všem osobám, které se podílely na zprostředkovávání podkladů pro tuto práci. Zejména Mgr. Ivetě Kameníkové za pomoc při volbě tématu, zpracování zadání, trpělivost a ochotu během tvorby této práce a za odborné názory a poznatky, které poskytovala během celé doby autorova studia. Dále by autor rád poděkoval Ing. Jaroslavu Farkašovi a společnosti Letecké služby Hradce Králové za poskytnutí nezbytných informací a dokumentů, bez kterých by se tato práce nedala dokončit. Na závěr autor cítí potřebu poděkovat rodičům, blízké rodině a přátelům za mentální a materiální podporu během tvorby této práce a celého studia, které jí předcházelo.

Prohlášení

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

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

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

V Praze dne 8. srpna 2021

.....
Podpis



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta Dopravní

PŘEDPOVĚĎ POČASÍ PRO LETIŠTĚ HRADEC KRÁLOVÉ

bakalářská práce

srpen 2021

František Štemberk

ABSTRAKT

Předmětem práce je analýza současného stavu meteorologického zabezpečení letiště v Hradci Králové a tvorby záznamu předpovědi počasí pro tuto lokalitu. Cílem práce je návrh optimální předpovědi počasí pro letiště v Hradci Králové. Praktická část je zaměřena na vytvoření důvěryhodné statistické analýzy dat skutečných předpovědí jednotlivých modelů a jejich následné zhodnocení a doporučení nejlepších Leteckým službám Hradce Králové.

KLÍČOVÁ SLOVA

Meteorologie, předpověď počasí, meteorologická služba, měření, statistika, letectví, letiště Hradec Králové, předpovědní model



CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

Faculty of Transportation Sciences

WEATHER FORECASTS FOR AIRPORT HRADEC KRÁLOVÉ

Bachelor thesis

August 2021

František Štemberk

ABSTRACT

The subject of the work is an analysis of the current state of meteorological security of the airport in Hradec Kralove and the production of a record of weather forecasts for this location. The aim of the work is to design an optimal weather forecast for the airport in Hradec Kralove. The practical part is aimed at creating a credible statistical analysis of data of actual forecasts of individual models and their subsequent evaluation and recommendations to the best Aviation Services of Hradec Kralove.

KEYWORDS

Weather, weather forecast, weather service, measurement, statistics, aviation, airport Hradec Kralove, forecast model



Obsah

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	7
ÚVOD	9
1 POPIS DOSAVADNÍHO STAVU METEOROLOGICKÉHO ZABEZPEČENÍ LETIŠTĚ V HRADCI KRÁLOVÉ	10
1.1 ÚVOD K LETIŠTI V HRADCI KRÁLOVÉ	10
1.2 HISTORIE LETIŠTĚ V HRADCI KRÁLOVÉ	10
1.3 METEOROLOGICKÉ ZABEZPEČENÍ LETIŠTĚ	11
1.3.1 <i>Letecké meteorologické stanice ČHMÚ</i>	11
1.3.2 <i>Meteor Praha – Ruzyně</i>	11
1.3.3 <i>VOLMET Praha</i>	12
1.3.4 <i>Automatic Terminal Information Service</i>	12
1.3.5 <i>Sonda DAVIS Vantage Pro2</i>	12
1.3.6 <i>Nedostatky meteorologického zabezpečení</i>	15
2 ANALÝZA DOSTUPNÝCH PŘEDPOVĚDÍ PRO LETIŠTĚ V HRADCI KRÁLOVÉ	16
2.1 KRITÉRIA VÝBĚRU	16
2.2 ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV	16
2.2.1 <i>Historie ústavu</i>	17
2.2.2 <i>Předměty činnosti ČHMÚ</i>	17
2.2.3 <i>Spolupráce ČHMÚ</i>	18
2.2.4 <i>ALADIN</i>	19
2.3 ECMWF	20
2.3.1 <i>Předměty činnosti</i>	20
2.3.2 <i>Asimilace a získávání dat</i>	20
2.3.3 <i>Modelování a predikce</i>	21
2.3.4 <i>Pravděpodobnostní prognózy</i>	22
2.3.5 <i>Integrated Forecasting System (IFS)</i>	22
2.4 GFS	23
2.4.1 <i>GFDL Finite-Volume Cubed-Sphere Dynamical Core (FV3)</i>	23
2.4.2 <i>Grid-Point Statistical Interpolation (GSI)</i>	25
2.5 ICON	26
2.5.1 <i>Ikosahedron modelu ICON</i>	26
2.5.2 <i>Parametry pro tvorbu prognóz</i>	27
2.5.3 <i>Provozní postup modelu ICON</i>	28
2.6 METEOBLUE	28
2.6.1 <i>Multimodelové předpovědi počasí společnosti meteoblue</i>	28
2.7 YR.NO	29
2.7.1 <i>Norský Meteorologický Institut (NMI)</i>	30
2.7.2 <i>EUMETSAT</i>	30
2.8 METEO.PL	31
2.8.1 <i>Interdisciplinary Centre for Mathematical and Computational Science (ICM)</i>	31
2.8.2 <i>Meteorology Meteo.pl</i>	31
3 VELIČINY DATABÁZE	33
3.1 ZÁPIS METEOROLOGICKÝCH VELIČIN LSHK	34
3.2 TĚPLOTA	34
3.3 POKRYTÍ OBLAČNOSTÍ	35
3.4 SRÁŽKY	35
3.5 RYCHLOST A SMĚR VĚTRU	36
3.6 ATMOSFÉRICKÝ TLAK	37
3.7 RELATIVNÍ VLHKOST A ROSNÝ BOD	37
3.8 VÝŠKA OBLAČNOSTI	37



3.9	HORIZONTÁLNÍ DOHLEDNOST	38
4	SBĚR METEOROLOGICKÝCH DAT	39
4.1	WINDY.COM.....	40
4.1.1	Práce s Windy.com	40
4.2	PRÁCE S YR.NO	42
4.3	PRÁCE S METEOBLUE.COM.....	44
4.4	PRÁCE S METEO.PL.....	46
4.4.1	Čtení meteogramů Meteo.pl	47
5	STATISTICKÁ ANALÝZA PŘEDPOVĚDÍ.....	48
5.1	NORMALITA DAT	49
5.1.1	Centrální limitní věta	50
5.2	POUŽITÉ POJMY.....	50
5.3	DVOUFAKTOROVÁ ANOVA	51
5.4	LEVEANŮV TEST	53
5.5	TEST VZÁJEMNÉ KORELACE.....	56
5.5.1	Výpis korelací.....	59
5.6	PEARSONŮV TEST.....	60
5.7	ANALÝZA PŘEDPOVĚDÍ SMĚRU VĚTRU.....	61
5.8	ANALÝZA PŘEDPOVĚDÍ DOHLEDNOSTI.....	61
6	VÝSLEDKY STATISTICKÉ ANALÝZY	64
7	ZÁVĚR	65
8	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	67



Seznam použitých zkratek

ALADIN	Aire Limitée, Adaptation Dynamique, Development International
API	Aplikační programovací rozhraní
ARPGE	Malá výzkumná akce velkého rozsahu
ATIS	Automatická terminální informační služba
CoE	Rada Evropy
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
ČR	Česká republika
FD ČVUT	Fakulta dopravní, České vysoké učení technické
DSA	Delta Systém Air
DWD	Německá meteorologická služba
ECMWF	Evropské středisko pro střednědobou předpověď počasí
ESA	Evropská kosmická agentura
EUMETSAT	Evropská organizace pro využití meteorologických družic
GFS	Globální systém předpovědí
ICAO	Mezinárodní organizace pro civilní letectví
ICM	Interdisciplinární centrum matematiky a výpočetních věd
ICON	Ikosahedrální nehydrostatický model
IFS	Systém integrovaných předpovědí
LKHK	Letiště Hradec Králové
LKPD	Letiště Pardubice
LMS	Letecká meteorologická stanice
LSHK	Letecké služby Hradec Králové
METAR	Meteorologická letištní zpráva
MHD	Městská hromadná doprava
MRF	Předpovědi středního dosahu



NASA	Národní úřad pro letectví a kosmonautiku
NATO	Severoatlantická aliance
NCEP	Národní centrum pro environmentální predikci
NEMS	NOAA environmentální modelový systém
NMI	Norský meteorologický institut
NMM	Nehydrostatický model mezoféry
NOAA	Národní úřad pro oceán a atmosféru
NRK	Norská vysílací společnost
OECD	Organizace pro hospodářskou spolupráci a rozvoj
SIGMET	Informace o důležitých meteorologických jevech
TAF	Terminální letištní předpověď
UNEP	Program OSN
UNESCO	Organizace OSN pro výchovu, vědu a kulturu
UTC	Koordinovaný světový čas
VHF	Velmi krátké vlny
VOLMET	Meteorologická informace pro letadla za letu



ÚVOD

Předmětem této práce je analýza současného stavu předpovědi počasí pro letiště v Hradci Králové a vyhledání nejlepší alternativy pro tvorbu předpovědí pro danou lokalitu. Následuje popis sběru dat aerometrických veličin a jejich následná statistická analýza, jejíž účelem je vyvození určitých doporučení pro letecké služby Hradce Králové a jiné uživatele letiště.

Po teoretickém úvodu, který je věnován meteorologickému zabezpečení Hradeckého letiště a popisu jednotlivých používaných modelů, se práce věnuje popisu jednotlivých sledovaných veličin, vysvětlení jednotlivých zdrojů předpovědí a statistické analýze. Statistická analýza je prováděna pomocí testů v počítačových programech, na základě výsledků jednotlivých testů autor práce uvádí doporučení pro cílové uživatele letiště v Hradci Králové.

Data předpovědí byla zaznamenávána z veřejně dostupných zdrojů zprostředkovaných organizacemi spravujícími jednotlivé modely. Zaznamenávána byla pomocí jejich internetových stránek. Při záznamu dat a jejich následném zpracování autor práce postupoval objektivně, data nebyla nijak upravována a práce je založena pouze na reálných, publikovaných hodnotách. Srovnávací data pocházejí z neveřejných dokumentů leteckých služeb Hradce Králové a jejich využití bylo schváleno příslušnou pověřenou osobou.

K výběru tohoto tématu vedl autora zájem o meteorologii, zejména v leteckém prostředí. Autor je studentem letecké školy, která využívá prostory letiště pro svou výuku, a tak už má jistý obrázek o nedostacích místních meteorologických zabezpečení. Celá práce je vnímána jako potřebný výzkum s cílem přinést nové poznatky a zlepšit meteorologickou infrastrukturu letiště v Hradci Králové.



1 Popis dosavadního stavu meteorologického zabezpečení Letiště v Hradci Králové

1.1 Úvod k letišti v Hradci Králové

Letiště se nachází na severním konci města Hradec Králové a přístupné je pomocí silnice, která vede až do areálu letiště, nebo pomocí autobusu MHD, který má zastávku před areálem. Letiště má statut veřejného vnitrostátního a neveřejného mezinárodního letiště. Jedná se o poměrně velké letiště s dvěma na sobě nezávislými drahami¹, kvalitním zázemím a pracovníky a úzkou spoluprací s leteckou firmou a leteckou školou Delta System Air, která zde vlastní několik budov. DSA není jedinou firmou v oblasti letiště, ale je jedinou firmou, se kterou má autor práce bližší zkušenosti, jelikož je jejím studentem. [1]

1.2 Historie letiště v Hradci Králové

Historie létání má v Hradci Králové téměř stoletou tradici, dříve zde profesor Jakub Hron testoval horkovzdušné balóny. T. G. Masaryk v místech letiště v roce 1926 dal vzniku své letecké lize. [1]

Od té doby se letiště vyvíjelo především v rámci vojenských a civilních operací, během nichž došlo k modernizaci letiště Hradec Králové a rozšíření letištních zařízení. Německá Luftwaffe během okupace vybudovala zpevněnou přistávací plochu na výcvik jejich pilotů, tato dráha je dodnes ohromnou výhodou místního letiště. Modernizace letiště pokračují dodnes, zejména díky letecké škole je zde hustý provoz, a tak je potřeba držet novodobé standardy v oblastech letecké dopravy. [1]

Dnes je LKHK jedním z největších neřízených letišť v České republice, jeho současnou ambicí je přijímání provozu mezinárodní dopravy. Je plně uzpůsobené pro provádění nočních letů a díky délce zpevněné dráhy zde dokáže přistát i velké dopravní letadlo, jako je například Boeing 737. Tento dopravní letoun byl na dráze v LKHK jednou dokonce testován. [1]

¹ Jedná se o betonovou dráhu 15L/33R a travnatou dráhu 15R/33L



1.3 Meteorologické zabezpečení letiště

Letiště ve svém letištním řádu v části meteorologické údaje uvádí následující zdroje: [2]

- LMS² ČHMU Praha – Komořany
- Meteor Praha – Ruzyně
- LMS Pardubice
- VOLMET Praha
- ATIS Praha – Ruzyně (LKPR)
- ATIS Brno – Tuřany (LKTB)
- ATIS Ostrava – Mošnov (LKMT)

1.3.1 Letecké meteorologické stanice ČHMU

Jedná se o spolupráci LKHK a Českého hydrometeorologického úřadu. Konkrétně jde o spolupráci poboček ČHMÚ v Pardubicích a Praze, protože jsou nejbližší letišti a zabývají se studiem počasí v oblasti letectví. ČHMU a jeho pobočkám je dále věnována kapitola 2.2. Přímou v Hradci Králové se také nachází pobočka ČHMÚ, která ale slouží k měření radiace a měření aerometrických veličin, není veřejně publikováno. Ambicí této práce bylo sehnat srovnávací data i z této pobočky ČHMÚ, nicméně poskytnutí informací o naměřených datech z pobočky je placenou službou, tudíž je tato práce založena pouze na srovnávacích datech poskytnutých LSHK.

1.3.2 Meteor Praha – Ruzyně

Meteorologická stanice v oblasti dnešního letiště Václava Havla. Stanice byla uvedena do provozu v roce 1976 a byla vybudována speciálně k účelům provádění meteorologických měření a pozorování. Tato stanice je výsledkem projektu bývalé Československé správy dopravních letišť a Hydrometeorologického ústavu Praha. [3]

Jedná se již o třetí lokalitu v areálu letiště, ve které se konají meteorologická měření a pozorování. Hlavními činnostmi jsou speciální letecká meteorologická pozorování, synoptická meteorologická pozorování a klimatologická pozorování. [3]

Synoptická a klimatologická pozorování zůstávají v základním rozsahu, speciální letecká meteorologická pozorování se ale rozšiřují a precizují podle potřeb a požadavků moderního leteckého provozu. V současné době jsou u prahů obou letištních drah měřeny a registrovány veličiny směru, rychlosti a nárazů větru, dráhová dohlednost a výška oblačnosti. Tlakové údaje používané pro nastavení výškoměrů letadel jsou vztahovány také k výškám prahů obou drah. Všechna měření základních meteorologických prvků nezbytných pro plynulý provoz letiště jsou zálohována přístroji v budově stanice. [3]

² „LMS“ – letecká meteorologická stanice



1.3.3 VOLMET Praha

Jedná se o automatické vysílání na VHF frekvencích. Obsahem vysílání jsou meteorologické informace z významných národních letišť, ale také letišť okolních států. Vysílání je ve formě čtených zpráv METAR a SIGMET.

METAR je zkratka pro meteorologické letištní zprávy. Obsahují informace o aktuální meteorologické situaci na určitém letišti v určitý zveřejněný čas. Jsou zveřejňované ve speciálním kódu. Nový METAR standardně vychází každých 30 minut. [4]

SIGMET jsou informace o důležitých meteorologických jevech na trati nebo v oblasti, které mohou ovlivnit bezpečnost letového provozu (např. turbulence, vulkanický prach, bouře). [4]

TAF je zkratka pro Terminální letištní předpověď. Oproti zprávám METAR se nejedná o zprávu o aktuálním stavu meteorologických podmínek, ale o jejich předpovědi. Formát zprávy TAF je podobný, kódován je stejným způsobem. Obvykle jsou zprávy TAF vydávány mezi 9 a 30 hodinami. 9hodinový TAF je vydáván každé 3 hodiny, 12 a 24hodinový TAF každých 6 hodin. [4]

1.3.4 Automatic Terminal Information Service

Vysílače ATIS jsou umístěny v blízkostech letišť, rovněž se vysílá na frekvencích VHF. Slouží jako zdroj aktuálních meteorologických informací pilotům letadel. Odposlech zprávy ATIS je požadavkem pro navázání komunikace mezi pilotem a řídicím letového provozu a je povinností pilota si zprávu odposlechnout. Každé vysílání má svůj identifikátor³, sdělením indikátoru pilot podává řídicímu informaci o odposlechu této zprávy. [4]

1.3.5 Sonda DAVIS Vantage Pro2

Dále také letiště disponuje svým vlastním měřením meteorologických veličin. K měření jednotlivých meteorologických veličin pracovníci leteckých služeb Hradec Králové mají k dispozici sondu značky DAVIS, která nese název Vantage Pro2.

Sonda je schopná měřit základní meteorologická data jako je směr a síla větru, teplota, množství srážek, vlhkost vzduchu a tlak. Všechny tyto hodnoty jsou v aktuálním čase zobrazovány na displeji pracovníkovi, který má službu na věži, ten je poté může využít pro sdělování informací leteckému provozu v prostoru letiště, a také jsou distribuovány jako volně dostupná informace na webových stránkách LSHK (reálné vyobrazení z webových stránek můžeme vidět na Obrázku 1.). Pracovník letiště také vede pravidelné záznamy dat nasbíraných sondou, tuto databázi LSHK umožnilo využít pro účely této práce. Pracovníci

³ Identifikátorem je písmeno hláskovací zprávy, např. „ATIS information PAPA“.

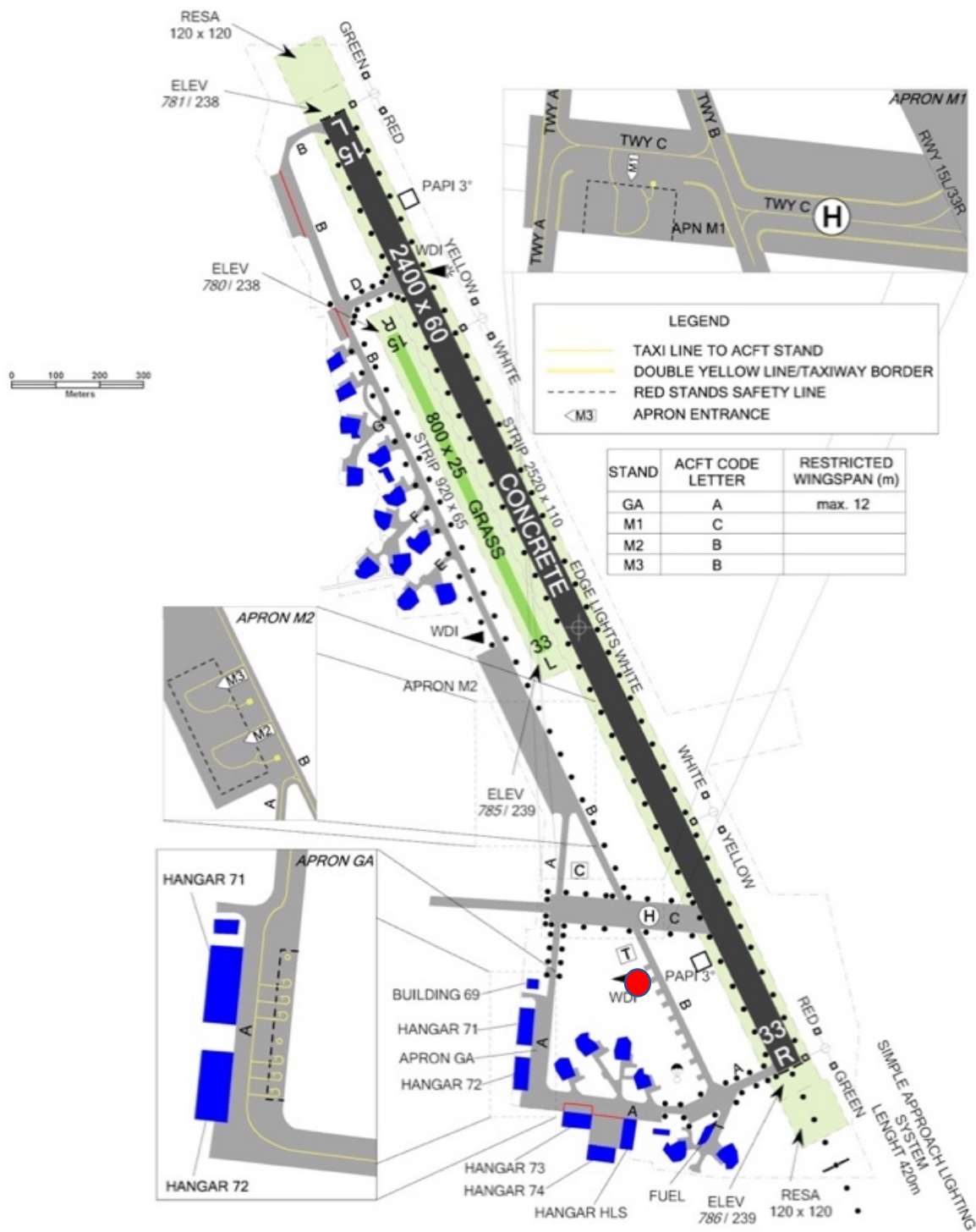


zapisují hodnoty v časech 08:00, 12:00 a 16:00. Tyto časy jsou důležité, jelikož podle nich byla zapisována data. (viz 4. kapitola).



Obrázek 1. Výstup dat sondy DAVIS Vantage Pro 2. [5]

Od pana Ing. Jaroslava Farkaše, vedoucího stanoviště LSHK pro poskytování informací známému provozu na letišti v Hradci Králové, bylo zjištěno umístění měřících sond a postup zápisu dat (této problematice je věnována 3. kapitola), umístění je zobrazené na obrázku č.2. Směr větru a srážky jsou zaznamenávány ze sondy umístěné u větrného pytle (v obrázku č.2 označeno červeným kolečkem), zbytek měřených veličin je zaznamenáván sondou umístěnou na řídicí věži (lokace věže je na obrázku vyobrazena malým písmenem „c“ uvnitř čtverce).



Obrázek 2. Umístění sondy vyznačené na mapě letiště [6]



1.3.6 Nedostatky meteorologického zabezpečení

Co na letišti zcela chybí a je velice důležitou informací pro veškeré oblasti letového provozu je měření výšky oblačnosti a dohlednosti. Výška oblačnosti i dohlednost je pro letiště velmi důležitou veličinou, proto je takový nedostatek do jisté míry limitující.

Jelikož místní měření není k dispozici, musí být použita jiná alternativa. Pro nedaleké letiště LKPD v Pardubicích, které je vzdálené asi 30 km jižně od LKHK vychází na stránkách meteo.řlp zprávy METAR a TAF (již byly vysvětleny). Problémem ale zůstává, že se jedná o úplně jiné letiště, a i když se může 30 km zdát jako zanedbatelná vzdálenost, zakládat předpověď pro letiště na základě dat z letiště úplně jiného nelze brát za exaktní formu předpovědi. Tato informace měla sloužit pouze jako pomoc a doprovodná informace.

V těchto situacích by se studenti letecké školy a soukromí uživatelé letiště jistě rádi spolehli na místní předpověď, než vykonají zbytečnou cestu do Hradce Králové, protože si například prostudovali pouze předpověď pro LKPD, která ale realitě v LKHK neodpovídá.



2 Analýza dostupných předpovědí pro Letiště v Hradci Králové

2.1 Kritéria výběru

Jelikož celou databázi tvoří autor sám a jedná se o zápisy jednotlivých předpovědí, bylo důležité si určit kritéria pro vybrání jednotlivých modelů, která byla předmětem studií. Modely měly být schopné provádět denní předpověď a poskytovat veškeré veličiny, které jsou pro leteckou předpověď podstatné a práce s nimi musela být pohodlná a v rámci možností snadná. Nejlepší formu předpovědi poté doporučím LSHK pro podporu jejich současného zabezpečení, tudíž je žádoucí, aby obsluha těchto internetových pomůcek zbytečně nezatěžovala pracovníky pověřené tímto úkolem.

Účelem této kapitoly je podání informací o předpovědních modelech a organizacích, které jednotlivé modely vytvořili a které je spravují. Konkrétnější informacím o jednotlivých měřených veličinách a sběru dat z modelů je věnována 3. kapitola této práce.

Také bych chtěl uvést určité důvody pro záměrné nepoužití předpovědního modelu ALADIN, který používá ČHMÚ. Z práce ho zcela nevynechám, jelikož jde o největší meteorologickou organizaci v České republice a vzhledem k problematice které se věnují o něm nějaké informace zmínit musím. Jak již bylo uvedeno, LSHK s úřadem už úzce spolupracují a modelu ALADIN již byla věnována část některých bakalářských prací, které autor četl. Bylo usouzeno, že bude smysluplnější dát prostor jinému modelu, LSHK tím pádem dostanou informace z jiných zdrojů a práce také bude řešit problematiku, které se zatím nikdo nevěnoval.

2.2 Český hydrometeorologický ústav

„ČHMÚ je ústředním orgánem veřejné správy České republiky. Působí v oblastech kvality ovzduší, hydrologie, klimatologie a v našem případě hlavně meteorologie.“ [7]

„Základním účelem příspěvkové organizace ČHMÚ je vykonávat funkci ústředního státního ústavu České republiky pro obory čistota ovzduší, hydrologie, jakost vody, klimatologie a meteorologie, jako objektivní odborné služby poskytované přednostně pro státní správu.“ [7]



2.2.1 Historie ústavu

Vznik prvního Československého státu v roce 1918 si vyžádal rozsáhlé aktivity v oblasti veřejné správy, včetně zřízení nových úřadů a agentur, které by nahradily ty stávající ve Vídni a Budapešti. Československá meteorologická služba taktéž prošla značným vývojem. Na konci roku 1919 vznikl v Praze Československý státní ústav meteorologie, který na našem území nahradil Ústřední ústav pro meteorologii a geodynamiku ve Vídni a Zemský ústav pro meteorologii a zemský magnetismus v Budapešti. [7]

Mezi jeho nové cíle a úkoly patřilo shromažďování a vědecké zpracování meteorologických pozorování v oblasti dnešních Čech a Slovenska, rozvíjení vlastních meteorologických projektů, přispívat do mezinárodních výzkumů a v první řadě poskytovat denní předpověď počasí a vydávání úředních posudků pro státní orgány ČR, organizace a soukromé osoby. [7] Vládní nařízení Československé republiky č. 96/1953 Sb. s účinností od 1. 1. 1954 spojilo původní meteorologický ústav s hydrologií a dalo vzniku dnešnímu hydrometeorologickému ústavu. S rostoucím trendem a potřebou ochrany životního prostředí v 70. letech 20. století byl v roce 1967 ústav obohacen o obor ochrany čistoty ovzduší. [7]

V roce 1963 na základě rozhodnutí tehdejšího ministerstva životního prostředí byla vystavěna hydrologická střediska v Ústí n. Labem, Ostravě, Brně, Praze, Hradci Králové, Českých Budějovicích a Plzni. Tato centra dala vznik dnešním oborově komplexním pobočkám ústavu. Po náročném roce 1969 došlo k rozdělení ústavu mezi sídla v Praze a Bratislavě. ČHMÚ ve své činnosti dále pokračoval. Byl spuštěn provoz observatoře v Praze-Libuši, stanice poskytuje radiosondážní a radiolokační služby. Jejím hlavním významem pro oblast meteorologie jsou však snímky z meteorologických družic. [7]

Mezi aktuálnější projekty patří např. velice drahá síť automatizovaného imisního monitoringu nebo meteorologické radary ve Skalkách na Moravě a v oblasti Praha Brdy z roku 2000. [7]

2.2.2 Předměty činnosti ČHMÚ

Na svých internetových stránkách ČHMÚ uvádí tyto předměty činnosti [7]:

- Racionální, věcné a ekonomické integrování výkonu státní služby.
- Zřizovat a provozovat měřicí stanice a sítě s využíváním telekomunikačních sítí.
- Odborné zpracovávání výsledků pozorování, měření a monitorování.
- Tvorba a správa databází.
- Poskytování předpovědí a výstrah.
- Provádění a koordinování vědecké výzkumné činnosti.



Na základě zvláštního pověření ČHMÚ rozšiřuje a publikuje za pomoci Ministerstva kultury neperiodické články a díla z oblasti tematické odborné literatury. V současnosti jde o časopis a jiná periodika. [7]

2.2.3 Spolupráce ČHMÚ

Při zrodu Světové meteorologické organizace byla Česká republika jedním z prvních zakládajících členů, ČHMÚ ve světě představuje národní zastoupení ve velké škále organizací a úzce spolupracuje s mnohými mezinárodními instituty a organizacemi. Mezi ty nejvýznamnější patří [7]:

- Mezinárodní organizace pro civilní letectví (ICAO)
- Organizace OSN pro výchovu, vědu a kulturu (UNESCO)
- Hospodářská komise OSN pro Evropu (UNECE)
- Program OSN pro životní prostředí (UNEP)
- Mezinárodní sdružení pro vědeckou hydrologii
- Evropská organizace pro využití meteorologických družic (EUMETSAT)
- Evropské centrum pro střednědobou předpověď počasí (ECMWF)

Na území České republiky jsou to zejména tyto spolupráce [7]:

- Vojenský geografický a hydrometeorologický úřad
- vysoké školy
- ústavy Akademie věd



2.2.4 ALADIN

ALADIN (Aire Limitée, Adaptation Dynamique, Development International) je numerický model pro krátkodobou předpověď počasí. Tento původně francouzský model společnosti Météo-France je vyvíjen od roku 1991 spoluprací patnácti evropských a afrických států, mezi které se řadí i Česká republika, ve které je model jediným oficiálním zdrojem leteckých meteorologických informací a je zde. Model je určený pro krátkodobou předpověď průběhu procesů v atmosféře v mezo-beta měřítku s rozměrem 10 km. [8]

Původně byl navržen jako dynamická adaptace očekávaných výsledků globálního modelu ARPGE s vysokým rozlišením. Tento model popisuje prudký atmosférický proces, který kolísá prostorově. V posledních letech bylo pro model také vyvinuto podrobných metod pro zlepšení počátečních podmínek prostřednictvím asimilace pozorování (asimilace dat proměnných ve třech dimenzích) a pokročilých kombinací globální analýzy a mezi měřítkových strukturálních simulací. [8]

Numerický model ALADIN pracuje na systému základních rovnic řešených spektrální metodou na ohraničené lokalitě semi-implicitním semi-lagrangeovským schématem. Oblast integrace modelu je vykreslena na mapě jako vertikálně zarovnaná projekce a koherentní souřadný systém je použit vertikálně. Procesy nepopsané dynamickým jádrem, na kterém je model založen, jsou simulovány v systému fyzikálních parametrů. [8]

Pro Českou republiku je tedy model ALADIN vypočten v mnohem vyšším rozlišení, okrajové podmínky ale stále čerpá z globálního modelu ARPGE. V horizontálním směru má ALADIN rozlišení 2,3 km. Vertikálně je počítán pro 87 hladin, ty ale nejsou veřejně dostupné. Aktualizován je po čtyřech hodinách na tři dny dopředu, v časech 00, 06, 12 a 18 UTC. V Evropě se nejedná o nejčastěji aktualizovaný model, některé evropské modely jsou aktualizovány častěji, tím také roste jejich přesnost. [9]



2.3 ECMWF

Evropské středisko pro střednědobé předpovědi počasí (ECMWF) je nezávislou mezinárodní organizací podporovanou 34 státy. ECMWF je jak výzkumný ústav, tak operativní služba s nepřetržitým provozem, která ve svých členských státech vytváří a publikuje číselné předpovědi počasí. Tyto údaje jsou plně k dispozici vnitrostátním meteorologickým službám v členských státech. Centrum nabízí také katalog předpovědních údajů, které si mohou zakoupit podniky z celého světa a další komerční zákazníci. Zařízení pro superpočítače (a související datový archiv) v ECMWF je jedním z největších svého typu v Evropě a členské státy mohou využít 25 % jeho kapacity pro své vlastní účely. [10]

V roce 1975 byla organizace založena a nyní zaměstnává přibližně 390 zaměstnanců z více než 30 zemí. Je jedním šesti členů následujících koordinovaných organizací [10]:

- Severoatlantická aliance (NATO)
- Rada Evropy (CoE)
- Evropská kosmická agentura (ESA)
- Organizace pro hospodářskou spolupráci a rozvoj (OECD)
- Evropská organizace pro využívání meteorologických družic (EUMETSAT)

2.3.1 Předměty činnosti

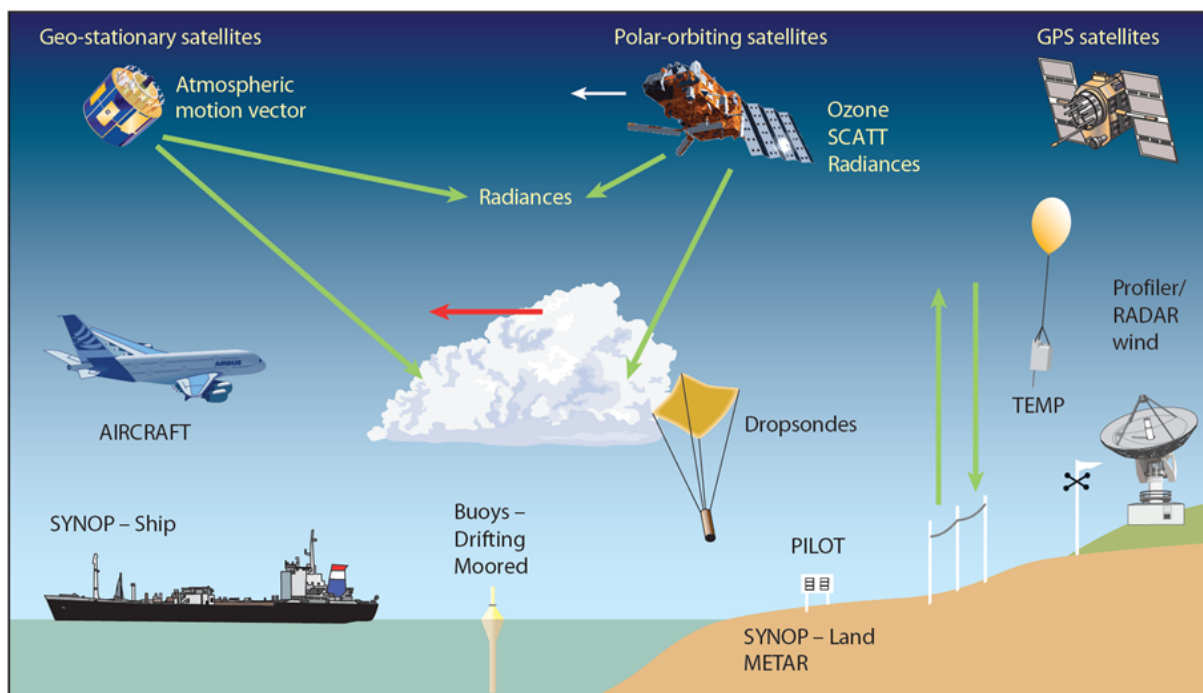
ECMWF poskytuje globální prognózy, klimatické analýzy a specifické datové soubory, navržené tak, aby splňovaly různé požadavky uživatelů. Ty jsou dostupné prostřednictvím webu, point-to-point šíření, datových serverů a vysílání. Cílem těchto předpovědí je najít nejpravděpodobnější vývoj počasí. Za tímto účelem je vytvářen soubor předpovědí, individuálně je každá předpověď popisem vývoje počasí. Dohromady určují pravděpodobnost řady budoucích povětrnostních scénářů. [11]

2.3.2 Asimilace a získávání dat

Pozorování a krátkodobé předpovědi jsou kombinovány do váženého průměru. Jejich váha závisí na související charakteristické chybě. Proto je charakterizace chyb nezbytnou součástí výzkumné a vývojové práce asimilace dat. ECMWF také pracuje na vývoji zaměřeném na zlepšení škálovatelnosti a účinnosti asimilačních systémů, protože prediktivní modely přecházejí k vyšším vertikálním a horizontálním rozlišením. [12]

K dispozici mají přibližně 90 satelitních datových produktů jako součást svých každodenních monitorovacích a asimilačních operací. Celkem je denně zpracováno a použito 40 milionů

pozorování. Většina z těchto měření jsou již zmíněná satelitní měření, využívána jsou ale i pozorování dostupná z nedružicových zdrojů, jako jsou letadla a zprávy z pozemních stanic. Predikce počasí se tradičně opírají o spolehlivá aktuální měření počasí. Moderní numerické předpovědi počasí nejsou výjimkou, protože se do značné míry opírají o pozemní i satelitní data. Tato pozorování nám poskytují informace o atmosféře, vodě a pevnině. [12]



Obrázek 3. Schéma systému sběru dat ECMWF [12]

2.3.3 Modelování a predikce

Veškeré předpovědi a reanalýzy vydávané ECMWF používají pro své predikce numerický model. Organizace si vytvořila vlastní atmosférický model a systém pro asimilaci dat, kterému říkají Integrated Forecasting System (IFS)⁴. Pro další komponenty zemského systému využívají komunitou vytvářených modelů. [13]

Pro přesnou předpověď je potřeba namodelovat dynamiku atmosféry a fyzikální procesy, k nimž dochází, jako je tvorba mraků. Stejně důležité je modelování dalších faktorů, které ovlivňují počasí. Hlavními faktory jsou složení atmosféry, mořské prostředí a pevninské procesy. Nicméně atmosféra je systémem vysoce chaotickým a není možné zjistit její přesné počáteční podmínky, každá předpověď je tedy limitována nedokonalostí numerických modelů. Mnoho jevů, které se vyskytují v extrémně malých velikostech, jako je tvorba mraků, se musí do výpočetních modelů navíc zjednodušovat. Ve výsledku to znamená, že veškeré prognózy

⁴ Integrated Forecasting System znamená v překladu systém integrovaných předpovědí.



podléhají určitému stupni nejistoty. ECMWF se pyšní jejich metodami pro kvantifikaci nejistot predikcí a poskytování pravděpodobnostních prognóz. [13]

2.3.4 Pravděpodobnostní prognózy

Jak již bylo řečeno, atmosféra je chaotický systém, takže i drobné chyby v našem současném odhadu jejího stavu mohou mít významný vliv na pozdější předpovědi. V hodnocení současného stavu atmosféry je tedy vždy určitá nejistota kvůli omezenému počtu dostupných pozorování a jejich nerovnoměrnému rozložení po celém světě. V praxi to znamená, že ECMWF ke svým předpovědím udává také jejich míru nejistoty. [14]

Oproti deterministickým předpovědím počasí je prognóza výslovně vyjádřená pravděpodobností lepší nejen proto, že poskytuje uživateli přesný časový údaj o tom, kdy může chyba nastat, ale také proto, že je pravdivější. Klasické deterministické předpovědi jsou totiž ve skutečnosti také prognózami pravděpodobnosti, pouze jsou zbaeny průměrné chybové úsečky, která s nimi ale může a měla by být vždy spojena. Tato chybová lišta znamená rozdělení pravděpodobností předpokládaných budoucích stavů kolem centrální hodnoty.

ECMWF se s tímto problémem vypořádává zajímavým způsobem. Model předpovědi počasí se spustí 51krát z mírně odlišných počátečních podmínek. Pro zohlednění vlivu nejistot v modelové formulaci se každá prognóza provádí pomocí mírně odlišných modelových rovnic. 51 scénářů se poté spojí buď do celkové průměrné předpovědi, nebo do malého počtu alternativních předpovědí. Také je lze použít pro výpočet pravděpodobností budoucích meteorologických jevů. [14]

2.3.5 Integrated Forecasting System (IFS)

Jedná se o kompletní model zemského systému vyvinutého v ECMWF ve spolupráci s již zmíněnou Météo-France, model je používán k tvorbě veškerých asimilací a předpovědi dat. Integrovaný systém prognózování je počítačovým softwarovým systémem, poskytujícím přístup ke všem potřebným aplikacím. [15]

ECMWF na svých stránkách každoročně publikuje podrobnou dokumentaci, dokument je rozdělen na osm částí, tyto části se věnují pozorováním, datové asimilaci, dynamickým a početním procedurám, fyzikálním procesům, systému predikcí, technickým a výpočetním procedurám a modelu vln. Jedná se o poměrně rozsáhlé dokumenty a jejich podrobnější analýza by přesahovala rozsah této práce, proto se jimi dále blíže nezabývá. [15]



2.4 GFS

Global Forecasting System (GFS), do 1. ledna 2003 známý jako GFS Aviation (AVN) a model GFS Medium Range Forecast (MRF) je globální systém pro předpověď počasí vyvinutý Národním centrem pro environmentální predikci (NCEP) a je spravovaný americkým úřadem NOAA. Poskytuje data pro desítky atmosférických a půdních proměnných, jako jsou teploty, větry, srážky a vlhkost půdy. Systém pokrývá celou planetu na základním horizontálním rozlišení 18 mil mezi mřížkovými body, které se používají pro tvorbu předpovědí na 16 dní do budoucnosti. Horizontální rozlišení klesá na 44 mil mezi mřížkovými body pro předpovědi na jeden a dva týdny dopředu. [16]

Systém funguje na podobném principu jako model IFS spravovaný zmiňovaným ECMWF, využívá prognóz předpovědí pro tvorbu predikcí. Počáteční podmínky pro operativní deterministické numerické předpovědi počasí středního dosahu jsou do systému dodávány z centra NCEP. GFS je postaveno pomocí GFDL Finite-Volume Cubed-Sphere Dynamical Core (FV3) a Grid-Point Statistical Interpolation (GSI) datovým asimilačním systémem. [17]

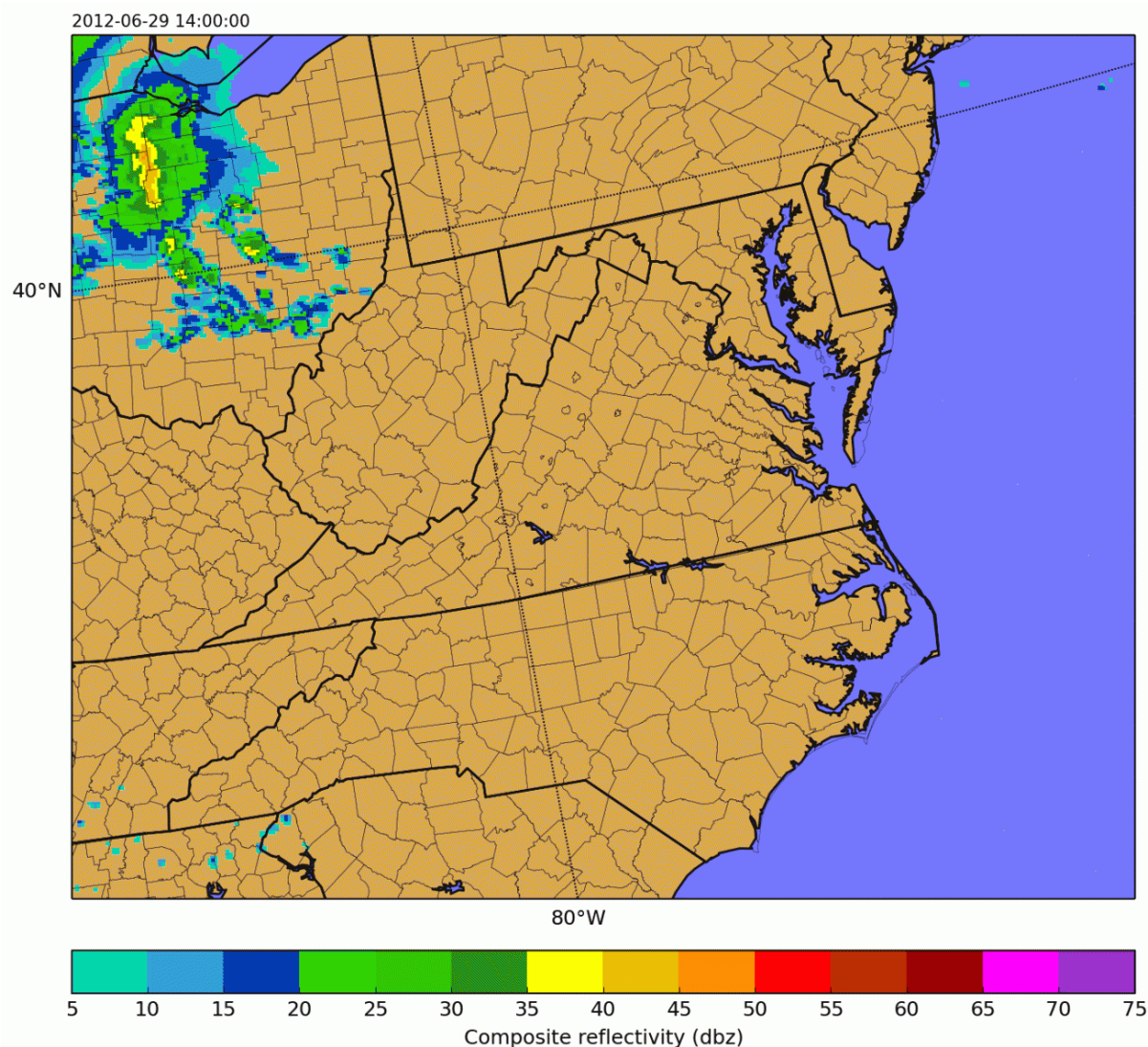
Do 3. března 2021 měl systém GFS 64 vertikálních vrstev začínajících na povrchu a sahajících do vrchní stratosféry s rozlišením na horizontálních 13 km. Nová verze GFS, která je v provozu od zmíněného data využívá 127 vertikálních vrstev rozprostírajících se do mezopauzy. Tyto počáteční podmínky jsou k dispozici čtyřikrát denně, cyklus začíná půlnocí UTC a aktualizuje se každých šest hodin. Pro každý cyklus data set zahrnuje první odhad počátečních atmosférických podmínek, který je dostupný na internetových stránkách NOAA. Data sety pro jednotlivé šestihodinové předpovědi jsou taktéž volně dostupné na stránkách NOAA a pocházejí již z asimilačních systémů. [16]

2.4.1 GFDL Finite-Volume Cubed-Sphere Dynamical Core (FV3)

Toto škálovatelné, flexibilní dynamické jádro je schopné jak hydrostatické, tak nehydrostatické atmosférické simulace. Cílem návrhu bylo dodržet, aby se diskrétnost co nejvíce řídila fyzikálními principy a aby co nejlépe využíval svou výpočetní efektivitu. Model je reverzně zinženýrován tak, aby zahrnoval vlastnosti, které se v oblasti techniky používají již desítky let, ale v atmosférické vědě byly poprvé využity právě modelem FV3. [18]

Vstupem pro dynamické jádro jsou rovnice popisující pohyb v atmosféře, jako je vlhkost putující vodním cyklem a převádí je do počítačem řešitelného jazyka. Je základním článkem modelu předpovědi počasí, jehož úkolem je sledovat, jak se mění zemská atmosféra a jaké povětrnostní podmínky by se v důsledku toho mohly utvářet. Dynamické jádro, sada fyzikálních rovnic popisujících fyzikální vlastnosti povětrnostních podmínek a data o reálných atmosférických podmínkách jsou tři základní pilíře pro každý atmosférický model. Díky vysoké

komplexnosti a složitosti dílčích úkonů numerické předpovědi je nezbytné využití superpočítačů. Současný exponenciální růst výkonu počítačů s každou generací má stejný efekt na schopnosti modelů určených k přesné předpovědi počasí. [18]

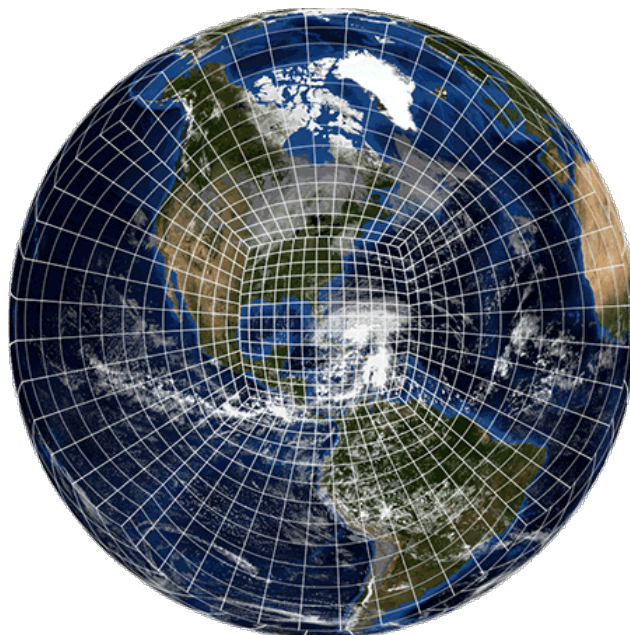


Obrázek 4. FV3 je schopný předpovědět pohyb bouřkového systému viditelného v levém horním okraji mezi jednotlivými státy [18]

2.4.2 Grid-Point Statistical Interpolation (GSI)

System GSI je komunitním variabilním systémem statistické interpolace mřížky. Používá se pro asimilaci dat a je navržený moderně a flexibilně tak, aby pracoval na různých výpočetních platformách. System je veřejně dostupný a je k dispozici pro volné komunitní využití. Pokud je systém spojen se souborovým systémem pro tvorbu prognóz, může sloužit jako 3D/4D systém kombinované hybridní asimilace dat, jako je tomu v případě využití systémem GFS. System také obsahuje funkce pro výpočet citlivosti pozorování. Spolu s globálním modelem tuto funkci použila NASA pro svou studii dopadu provozních dat. [19]

Pro účely této práce postačí tyto informace, velmi zjednodušeně systém slouží jako globální mřížka pro uložení dat, podrobná analýza by nejspíš vyžadovala svou samostatnou bakalářskou práci.



Obrázek 5. Ukázka mřížky systému GSI [20]



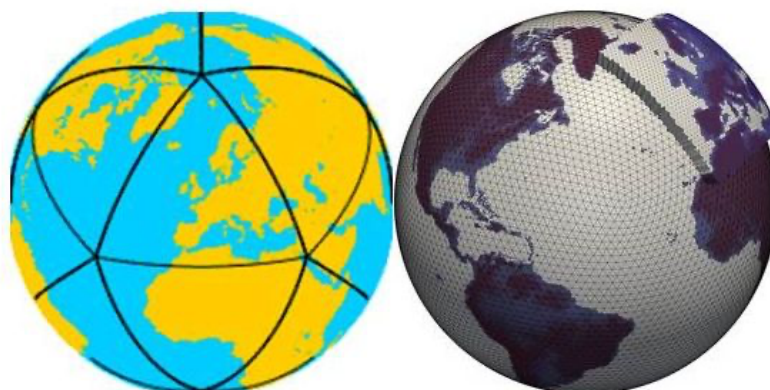
2.5 ICON

Ikosahedrání⁵ nehydrostatický model (ICON) je předpovědním modelem německé Deutscher Wetterdienst (DWD). ICON je potomkem modelu s názvem GME, jehož provozní výroba byla zahájena v roce 1999. Byl prvním funkčním modelem pro numerickou předpověď počasí na světě využívajícím ikosahedronovou síť a model ICON si tuto základní strukturu mřížky zachoval. Ve srovnání s tradičními postupy pro tvorbu modelovacích mřížek, jako je použití zeměpisné šířky, poskytují ikosahedronové mřížky téměř dokonalé homogenní pokrytí celé zeměkoule. Vyvarují se tak problémům souvisejícím se sblížením se poledníků v sítích používajících zeměpisnou šířku a délku, což velice zefektivňuje výpočetní schopnosti modelu, jelikož při tradičním řešení těchto oblastí je zapotřebí vytvářet a řešit složité rovnice. [21]

2.5.1 Ikosahedron modelu ICON

Mřížka se začíná generovat vepsáním ikosahedronu do koule. Poté, co spojíme 12 vrcholů ikosahedronu s geodetickými liniemi získáme 20 rovnostranných sférických trojúhelníků. Délka okraje každého z trojúhelníků je přibližně 7054 km. Požadovaného prostorového rozlišení se dosáhne iterativním dělením trojúhelníkových stran. Efektivní velikostí jednotlivých ok modelové mřížky je pak druhá odmocnina střední plochy sférických trojúhelníků. Současná provozní verze globální sítě modelu ICON používá 2 949 120 trojúhelníků, toto množství odpovídá průměrné ploše 173 čtverečních km a efektivní velikosti zhruba 13 km. Veškeré skalární prognostické modelové proměnné, jako je teplota, hustota apod. jsou umístěny v obvodu trojúhelníku. Okrajově-normální složky větru se umísťují do okrajových středů. Proměnné modelu, jako hustotu, teplotu, vítr, tlak atd., které odpovídají střední ploše trojúhelníkových buněk mřížky o rozloze zmíněných 173 čtverečních km, je nutné považovat za průměry v rozloze této buňky. To samé platí pro vnější parametry, jako je orografie. Velká pohoří totiž mohou být ve 13 km rozlišení zobrazena poměrně dobře, pro menší geografické útvary je ale potřeba využití jemnějších ok mřížky. Z tohoto důvodu je společností DWD provozován ještě model COSMO-DE, který má omezenou plochu s oky o velikosti 2,8 km. [21]

⁵ Ikosahedron = dvacetistěn



Obrázek 6. Schéma ikosahedronového modelu ICON nalevo, příklad mřížky s výřezem Evropy napravo [21]

2.5.2 Parametry pro tvorbu prognóz

Stěžejními parametry pro prognózy modelu ICON jsou hustota vzduchu, virtuální potenciální teplota používaná pro diagnostiku tlaku, horizontální a vertikální rychlost větru, vlhkost, voda v mracích, led v mracích, déšť a sníh. Proměnné se počítají pro každou buňku mřížky na všech devadesáti úrovních modelu navazujícího na terén a sahajícího do 75 km nad povrchem, výsledkem je přibližně 265 milionů bodů mřížky. Navíc jsou řešeny ještě prognostické rovnice pro teplotu půdy a obsahu vody v půdě, tyto rovnice jsou řešené těsně nad povrchem. Za přítomnosti sněhové pokrývky je přidána předpověď hustoty sněhové vody a hustoty sněhu. Pro ledem pokryté části oceánů se zlomek mořského ledu analyzuje jednou denně z místních pozorování. Tloušťka a teplota povrchu ledu je předpovídána pomocí jednoduchého modelu mořského ledu. [21]

Numerické předpovědní modely také používají fyzikální parametrizace pro procesy, které probíhají v mnohem menších horizontálních škálách, než jsou velikosti ok modelu. Mezi takové procesy patří adiabatické jevy, jako záření, turbulence, tvorba mraků a srážky. [21]



2.5.3 Provozní postup modelu ICON

U modelu ICON je důležité rozlišovat jeho dva cykly. Jedním je systém asimilace dat a druhý je režim předpovědi. Systém asimilace dat slouží k určení optimálního počátečního stavu pro průběh prognózy, principiálně stejný postup jako u výše zmiňovaného modelu ECMWF. Za tímto účelem vzniká tzv. první odhad, což je kombinace tříhodinových předpovědí z předchozí analýzy se všemi pozorováními, která jsou platná pro tříhodinové časové okno se středem k datu analýzy použitím metody 3D variabilní asimilace. Aktualizace předpovědí probíhají čtyřikrát denně. Předpovědní rozsah pro předpovědi vydávané v 00 a 12 UTC je 180 hodin, pro ty vydávané v 06 a 18 UTC je to 120 hodin. [22]

Při konfiguraci využívané dnes potřebuje ICON přibližně 8 minut času na předpovědní den, ICON běží na superpočítači DWD. Za tento poměrně krátký čas vyprodukuje kolem 900 Gb dat na jednu 7denní předpověď. Aby byly zajištěny boční podmínky pro model COSMO-EU, výstupy se prvních 78 hodin předpovědi zapisují hodinově, poté se frekvence výstupu sníží na tři hodiny. Kromě prognostických veličin model ICON také poskytuje řadu diagnostických veličin, která je dále poskytována uživatelům. [22]

2.6 Meteoblue

Tento švýcarský projekt původně vznikl na univerzitě v Basileji a byl založený na modelech NOAA/NCEP. Jejich předpovědi si velmi rychle oblíbily řady vědců, horolezců, pilotů a astronomů z celé Evropy. Jako společnost byla meteoblue založena v roce 2006, pro zajištění spolehlivých provozních prognóz a lepších průmyslových služeb autoři implementovali nezávislou komerční výpočetní infrastrukturu a vývoj vlastních produktů. [23]

Od roku 2007 počítačový cluster⁶ denně zpracovává prognózy vysokého rozlišení pro Evropu, Afriku, Jižní Ameriku a od roku 2008 také pro Jihovýchodní Asii. V roce 2013 byly přidány globální předpovědi pro Indii a Nový Zéland. Pro oblasti, které tento výčet nezahrnuje, meteoblue zpracovává regionální modely a chod modelů NOAA/NCEP a GFS, s ambicí pokrýt plochu celého světa. Na jejich internetových stránkách je tak možné dohledat diagramy zmíněných modelů a také kontinuální lokalizované prezentace. [23]

2.6.1 Multimodelové předpovědi počasí společnosti meteoblue

Meteoblue na svých internetových stránkách zobrazuje, jak tradiční soubory předpovědí, jako jsou kombinované předpovědi výše zmiňovaného modelu GFS, tak i své multimodelové předpovědi, které jsou vydávány s větším rozlišením a podle meteoblue lépe zhodnocují

⁶ Cluster, přeloženo jako shluk, v kontextu chápejte jako seskupení výpočetních sil celého meteoblue.



lokální povětrnostní podmínky. Kombinují totiž předpovědi vícera modelů a snaží se přehledně v jednom grafu ukázat, jak pravděpodobné je, že tyto předpovědi budou pravdivé. Kombinované předpovědi rozdělují do dvou typů, NMM modelů a NEMS modelů. NMM modely fungují od roku 2007, jde o regionální modely a jsou optimalizované pro komplexní terén. Meteoblue zobrazuje 5 modelů NMM, pro centrální Evropu se 4 km rozlišením na 72 hodin, Evropu s 12 km rozlišením, Jižní Ameriku, Jižní Afriku a Jihovýchodní Asii s 18 km rozlišením a všechny tři s platností na 180 hodin. NEMS je nástupcem modelů NMM, funguje od roku 2013. Je široko-spektrálním modelem používaným jak pro globální, tak pro lokální domény. Jeho výhody oproti předchůdci spočívají hlavně v předpovědi tvorby mraků a předpovědích srážek. Modely jsou vydávány téměř pro celý svět, podrobnější informace o jednotlivých NEMS modelech Meteoblue publikuje na svých internetových stránkách. [24]

2.7 Yr.no

Yr je online meteorologickou službou Norského meteorologického institutu (NMI) a Norské vysílací společnosti (NRK). Tyto dva instituty spolu fungují už od roku 1923 a od té doby zajišťují přenos meteorologických informací pro Norsko a jeho blízké sousedy. Yr.no je jedinečné svým přístupem k datům a detailem svých předpovědí. Zdarma poskytují např. svou API⁷ uživatelům, tudíž je možné naprogramovat svou vlastní aplikaci a jako zdroj použít data společnosti. Přístup k internetovým stránkám byl umožněn v září roku 2007, v Norsku se Yr.no stalo rychle velice populární stránkou a rychle se rozšířila do celé Evropy. Dnes jsou předpovědi dostupné i v anglickém jazyce pro místa po celém světě. Kromě předpovědí Yr.no také poskytuje novinky o počasí a klimatu, ty už jsou ale dostupné pouze v norštině. Hlavní náplní práce portálu jsou krátkodobé předpovědi vydávané v rámci hodin, data pro tyto předpovědi jsou poskytována již zmíněnou společností ECMWF a společností EUMETSAT. Yr.no také v rámci jejich činnosti provádí po procesové a statistické opravy výstupů z těchto modelů pro primární oblasti svého zájmu, proto autorovi přišlo zajímavé použít pro sběr i data z tohoto portálu, navíc k datům získávaným z modelu ECMWF. [25][26]

⁷ API je kód, který uživateli umožňuje ukládat do svého kódu meteorologická data, Yr.no má API napsanou v programovacím jazyce Javascript.



2.7.1 Norský Meteorologický Institut (NMI)

Tento ústav je státní agenturou podřízenou Ministerstvu klimatu a životního prostředí, jedná se o ekvivalent ČHMÚ pro Norsko. Je vedený radou, ředitel spravuje každodenní činnosti úřadu, ústřední sídlo úřadu má kanceláře v Oslu. Ústav je odpovědný za meteorologické služby pro civilní a vojenské účely, jejich práce zajišťuje, aby authority, společnosti, instituce a veřejné osoby byly ochráněny před vlivy životního prostředí. Mimo jiné NMI vydává předpovědi, studuje Norský klimát a provádí klimatologická hlášení, shromažďuje meteorologická data, provádí výzkumné a rozvojové práce, a poskytuje letecké služby. Tyto vědecké úkoly ústavu byly zákonem přijaty 9. prosince roku 2005. [26]

Ústav byl založen již v roce 1866, Norští meteorologové se tedy významně podíleli na rozvoji meteorologie do podoby, kterou známe dnes. Norský institut je tedy dnes předním mezinárodním centrem v této oblasti. [26]

2.7.2 EUMETSAT

Evropská operativní satelitní agentura pro monitorování počasí, klimatu a životního prostředí z vesmíru (EUMETSAT) je mezivládní organizací se sídlem v německém Darmstadtu. V současné době má 30 členských států. Provozují čtyři geostacionární družice Meteosat nad Evropou, Afrikou a Indickým oceánem, poté ještě tři polární družice Metop jako součást Joint Polar Systému (JPSS) sdílené s NOAA. Jsou také partnerem kooperativních misí Jason, které slouží k mapování hladiny moře, do těchto misí je zapojena Evropa a Spojené státy. Ústav je dále pověřen Evropskou unií prováděním čtyř misí Sentinel v rámci vesmírného programu Copernicus. Satelity a produkty organizace jsou důležitým zdrojem dat pro předpověď počasí a významně přispívají ke sledování životního prostředí a změnám klimatu. [27]



2.8 Meteo.pl

Díky doporučení letecké meteoroložky na služebně v Ruzyni a studentce PhD. Na MFF UK Terezy Novákové autor do databáze zařadil také model polské Varšavské univerzity. Zařadil ho zejména kvůli jeho schopnosti zobrazovat výšku oblačnosti a dohlednost, kterou je kromě tohoto modelu schopný zobrazovat pouze model ECMWF a pro tvorbu leteckých předpovědí jsou informace o těchto dvou veličinách velice důležité. Model je vyvíjen společností ICM, která spadá pod kompetence Varšavské univerzity. [28]

2.8.1 Interdisciplinary Centre for Mathematical and Computational Science (ICM)

ICM je předním datovým vědeckým zařízením ve střední Evropě. Specializují se na vysoce výkonné počítače pro zpracování, analýzu, vizualizaci a pokročilé výpočetní úlohy. Mají vysoce kvalifikovaný tým odborníků a jsou vybaveni výkonnou datovou infrastrukturou. Poskytují optimalizovaná, komplexní řešení pro výzkum, podnikání a veřejný sektor. Cílem organizace je porozumět datům a poskytovat inovativní řešení organizacím a institucím za využití odborných znalostí v oblasti datových věd. Mezi mnohé projekty této organizace patří také Meteo.pl. [29]

Organizace vznikla roku 1993 jako základní akademická jednotka na Varšavské univerzitě. Mají tedy více než 20 let zkušeností ve vysoko škálových výpočtech, modelování a analýze dat. [30]

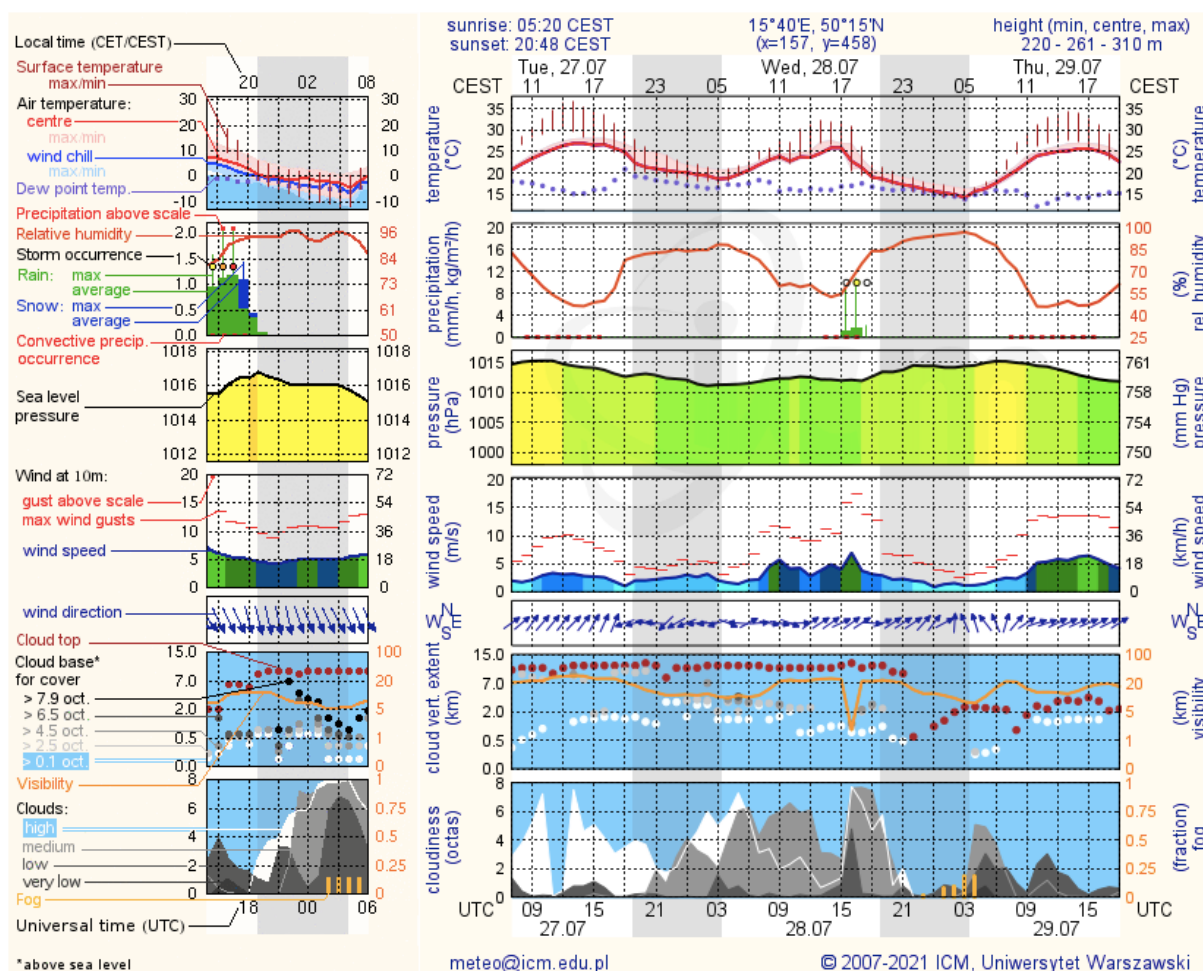
2.8.2 Meteogramy Meteo.pl

Meteo.pl vydává svá data jako meteogramy pro uživatelem vybrané souřadnice. Meteogram (viz Obrázek č.7) je grafické zobrazení meteorologické veličiny na časové ose. Na výběr má uživatel meteogramy ze dvou zdrojů. Jedním je model UM, klasický model pro předpověď počasí a druhým je model WAM⁸, který tvoří předpověď vln mořských ploch. Model UM na stránkách existuje pro dvě měřítka, 1,5 km a 4 km. Model je počítán standardně čtyřikrát denně, počáteční podmínky jsou vloženy o půlnoci a poté se model aktualizuje každých šest hodin v časech 06, 12 a 18 UTC. Předpovědi se na stránkách zobrazují se zhruba půlhodinovým zpožděním. Model UM s rozlišením 1,5 km má předpovědi na následujících 78 hodin, na rozlišení 4 km je tato doba delší, a to 120 hodin. [31]

⁸ Tento model pro mou práci nemá žádný význam, proto se mu nebudu blíže věnovat.



Zdrojem dat pro počáteční podmínky modelů pro místní oblasti, jako je Evropa, portál Meteo.pl získává z globálních modelů. Pro model UM jsou data získávána ze stejnojmenného modelu UM, který je počítán v britské MetOffice. Jsou také shromažďována místní pozorování meteorologických služeb, které provádějí měření na svých pověřených územích. Model dále pracuje například s daty ze satelitů a námořních údajů. Pro každý model, který byl popisován, jsou tyto zdroje v podstatě stejné. Díky mechanismu jejich asimilace do globálních modelů jsou takto získaná data nepřímo zohledňována v procesu tvorby předpovědi počasí. [31]



Obrázek č.7 Ukázka meteogramu z portálu Meteo.pl⁹ [32]

⁹ Meteogramům a práci s jednotlivými internetovými portály se věnuje v kapitole 4.



3 Veličiny databáze

Tato kratší kapitola je věnována veličinám, které byly předměty sběru dat. Veličiny byly shromažďovány pro oblast letiště v Hradci Králové. Data byla zaznamenávána každý den, počínaje 1. lednem 2021 a poslední sběrné datum bylo 28. června 2021. Pro záznam dat byl použit soubor v tabulkovém editoru Microsoft Excel, větší prostor je popisu souboru věnován ve 4. kapitole. Zapisovány byly 24hodinové předpovědi z výše zmíněných modelů, po domluvě s vedoucí bakalářské práce a Leteckými službami v Hradci Králové byly určeny jako sběrné hodiny 8:00, 12:00 a 16:00. Tyto časové úseky byly vybrány z důvodu koordinace s časy, ve kterých zaznamenávají údaje pracovníci LSHK. Hodnoty veličin z předpovědí byly vždy zaznamenávány na následující den na jeden z uvedených časových úseků, ty se v průběhu celého průzkumu periodicky opakovaly. Pokud z nějakého důvodu chyběla hodnota některého z modelů, byl celý den vynechán, aby byla zachována objektivita této práce. Databáze zahrnuje následující aero metrické veličiny – teplotu, pokrytí oblačností, srážky, rychlost větru, směr větru, relativní vlhkost, rosný bod a tlak. U modelu ECMWF a Meteo.pl byla navíc sbírána výška oblačnosti a dohlednost, z modelu Meteo.pl byly zaznamenávány jen tyto veličiny, důvody tohoto rozhodnutí jsou uváděny v kapitole 4.

Veličiny, které byly zaznamenávány jsou nejdůležitějšími veličinami s významem pro letectví. V podstatě by stačily pro tvorbu jednoduché zprávy METAR. S tímto přístupem byl veden celý výzkum, přeci jen se jedná o předpověď počasí pro letiště. Na letišti v Hradci Králové ale nezaznamenávají všechny veličiny, které byly předmětem výzkumu. Pracovníci zde zaznamenávají pouze teplotu, pokrytí oblačností, dohlednost, rychlost větru, směr větru, tlak a srážky. Způsob záznamu srážek také poněkud ztížil vypracování statistického rozboru, více v kapitole 5.

Veličinami, které tedy nebylo možné statisticky prošetřit, jsou relativní vlhkost, rosný bod a základna oblačnosti. Autor práce kontaktoval Hradeckou pobočku ČHMÚ s prosbou o doplnění chybějících dat, ale tato služba je placená a jedná se o poměrně vysokou částku, která z autorova pohledu nepřísluší škále této práce. Tyto tři veličiny byly tedy ze statistické analýzy odebrány, v tabulkách jsou ale uváděny. Sběr dat zabral poměrně dlouhou dobu a autor práce pevně věří, že tato naměřená data mohou ještě někdy představovat určitou formu pomoci v akademických výzkumných činnostech.



3.1 Zápis meteorologických veličin LSHK

Zápis dat provádí pracovník, který je tou dobou zodpovědný za podávání informací leteckému provozu v prostoru letiště. Každý den se jedná o 8., 12. a 16. hodinu, některé dny však pracovníci zaznamenávají údajů víc. Na obrázku pod textem je ukázka tabulky, kterou LSHK používá pro záznam ve své dokumentaci. Dokumentace není přístupná veřejnosti, po svolení Ing. Jaroslava Farkaše je uvedena alespoň ukázka. Tato data následně sloužila jako srovnávací data předpovědí jednotlivých modelů, které byly předměty výzkumu této práce.

Údaje o letišti								
ČAS	06:00	06:15	06:30	08:10	08:50	09:30	12:10	16:15
QBA	10km	1500m	10km	5000m	10km	10km	10km	10km
Množství oblačnosti	7/8	8/8	6/8	8/8	5/8	5/8	5/8	7/8
QAN	270°/5kt	300°/8kt	270°/8kt	280°/15kt	270°/17kt	270°/20/32kt	300°/17kt	300°/16kt
QNH	1017hPa	1017hPa	1017hPa	1019hPa	1019hPa	1020hPa	1021hPa	1022hPa
Reg QNH	-	-	-	1014hPa	1014hPa	1014hPa	1016hPa	1019hPa
TEPLOTA	+0,1°C	+0,4°C	+0,5°C	1°C	2°C	4°C	+5,2°C	6°C
Význačné meteo. jevy	NIL	-SN	NIL	-SN	NIL	NIL	6LS	NIL
RWY	33R	33R	33R	33R	33R	33R	33R	33R
Ostraha:	p. HROCHOVA' - BZ			Připravenost JSDH: CAS K25, FFRS 2				
Kontrola RWY, TWY a provozních ploch:	SCHOPNĚ							
Kontrola vybavení stanoviště PIP:	BZ							
Vydané NOTAM/SNOWTAM:	40618/21 - OPN HRS 70583/21 - APN 112, 113 DAY ONLY							

Obrázek č. 8 Tabulka pro záznam meteorologických veličin z neveřejné dokumentace LSHK

3.2 Teplota

Tento poměrně triviální ale důležitý údaj byl z hlediska sběru velmi jednoduchý. Každý portál ji publikuje stejným způsobem, zaokrouhlenou na celé číslo. V letectví má teplota velký význam. Ovlivňuje spoustu faktorů, výkonnost letadla, tvorbu námrazy, tvorbu náledí na provozních plochách a jiné. Z těchto důvodů je záznam teploty velice důležitý a určitě tuto veličinu najdete v každé předpovědi počasí. Hodnoty byly zaznamenávány ve stupních Celsia (°C).



3.3 Pokrytí oblačností

V letectví je nejužívanější formou pokrytí oblačností vyjadřováno v osminách. Stejně k tomuto údaji bylo přistupováno v této práci. Modely, které zobrazují pokrytí oblačností v procentech, byly matematicky přepočteny na zlomek, následně byly hodnoty zaokrouhleny na nejbližší osminu. U modelů, které používají jinou formu sdělování (např. grafické schéma), byly vždy použity vysvětlivky k jednotlivým schématům a podle nich určen správný údaj převedený na osminy. Meteo.pl tento údaj vyjadřuje graficky pomocí osmin.

3.4 Srážky

Tento meteorologický jev byl v rámci pozorování velmi vzácný, ale v nějakých dnech přeci jen nastal. Použitou jednotkou bylo standardních mm/h, v případě stránek meteoblue bylo nutno hodnotu vydělit 3, jelikož zobrazují jednotku mm/3h. V případech, kdy předpověď ukazovala pravděpodobnost srážek, se údaje z předpovědí lišily asi nejvíce v porovnání s ostatními měřeními údaji. Pro účely práce nebylo rozlišováno, jestli se jedná o déšť nebo sněžení, i když každý model umí zobrazit rozdíl. Zajímavé pro autora také bylo, že model NEMS ukazoval srážky opravdu minimálně, v několika případech se také stalo, že byl jediným modelem, který žádné srážky nepředpovídal. Dlouho autor nabýval podezření, že jde o nějakou chybu v zobrazení na portálu, kde byly hodnoty zaznamenávány, ale později ve výzkumu občas nějaké srážky předpovídal, zobrazení tedy fungovalo zcela správně.

Problémem pro výzkum bylo, že LSHK data o srážkách zaznamenává pouze v podobě kódových zkratk používaných např. ve zprávách METAR. Tyto kódové zkratky byly přeloženy do číselných veličin podle předpisu L3 – Meteorologie, předpis ale tuto problematiku neřeší. Tabulku pro převod nakonec poskytl ICAO doc. 9837 – Manual on Automatic Observing Systems (tabulka je zobrazena na obrázku č.9).

Precipitation Type	Light	Moderate	Heavy
Drizzle	<0.1	0.1 to 0.5	>0.5
Rain*	<2.5	2.5 to 10.0	>10.0
Snow	<1.0	1.0 to <5.0	≥5.0

Obrázek č. 9 Převodní tabulka použitá pro převádění METAR kódu [33]



V datech LSHK z časového úseku, který byl předmětem této práce se objevují následující zkratky:

- SN – zkratka pro „sněžení“
- RA – zkratka pro „déšť“

Pokud byla zkratka opatřena matematickým znaménkem „+“, byla interpretována jako „heavy“. Matematické znaménko „-“, byla interpretována jako „light“. V případě, kdy byla zkratka uvedena bez znaménka, byla zkratka interpretována jako „moderate“. Jako srovnávací hodnota byla zapisována hraniční hodnota v případě intervalů, které mají pouze jednu hodnotu (např. „light“ u sněžení zapsáno jako 1 mm/h), v případě intervalů, které obsahují obě hraniční hodnoty, byla použita jejich střední hodnota. Tyto zkratky jsou v databázi LSHK zapisovány do řádku pro význačné meteorologické jevy (viz Obrázek č. 8).

3.5 Rychlost a směr větru

Vítr je faktor, který pilota v letectví zajímá asi nejvíce. Z jeho směru se dá vydedukovat, která dráha bude v používání, jak obtížná pro mě bude pilotáž letadla, je důležitým faktorem v plánování letů a také mají letadla určité limitace, které se nesmí překročit v případě, kdy je jeho rychlost příliš vysoká. V letectví je tradičně vyjadřován v námořních mílích za hodinu, tedy v „knotech“, pro databázi byla ale použita jednotka [m/s]. Většina zdrojů totiž hodnotu zobrazovala takto, nebo se na její zobrazování dala nastavit. Hodnoty u veškerých portálů byly zaokrouhlovány na jedno desetinné místo, to pro účely práce bohatě stačí, a tak byl stejný způsob zápisu zvolen i pro zápis dat výzkumu této práce.

Směr větru je v modelech a portálech zobrazován pomocí šipky a byl samotnými aplikacemi zaokrouhlován použitím písmen. Zaokrouhlován byl následujícím způsobem – severní (S), severovýchodní (SV), východní (V), jihovýchodní (JV), jižní (J), jihozápadní (JZ), západní (Z) a severozápadní (SZ).

V dokumentaci LSHK je vítr vyjadřován ve zmíněných [kt], hodnoty byli přepočítány na jednotku [m/s] následovně:

$$"m/s = \frac{kt}{2}"$$

Dále je pro dokumentaci použit zápis směru ve „°“, zaokrouhlován byl matematicky na hodnotu odpovídající nejbližší světové straně.



Častým jevem v zápise dat větru LSHK uváděly jeho směr zkratkou „var“. Zkratka vychází z anglického slova „variable“, tedy proměnlivý. Nebylo tedy možné jasně určit směr větru. V těchto případech je tedy ve statistické analýze hodnocena pouze jeho síla, jelikož žádný z modelů předpověď proměnlivého větru neudává. Dalším slovem používaným v zápisech pro vítr je „calm“, tedy bezvětří. V těchto případech byla pro statistiku síla větru vyjádřena číslicí 0.

3.6 Atmosférický tlak

Atmosférický tlak je pro letiště důležitý kvůli nastavení výškoměru v letadlech. Výškoměr je principiálně tlakoměrem, měří tedy statický tlak okolního prostředí, ve kterém se letadlo nachází. S výškou klesá tlak, výškoměr je schopen tento pokles zobrazit jako výšku. Pro provoz je důležité, aby měla všechna letadla nastavený výškoměr na stejnou hodnotu QNH (atmosférický tlak přepočtený na hladinu moře). Pokud je tato podmínka zajištěna, každému letadlu ukazuje výškoměr stejné hodnoty a letadla tak mohou dodržet předepsanou okružovou výšku nebo vertikální separaci provozu. QNH se letadlo dozví při prvním kontaktu s místním řízením letového provozu, je povinností pilota ho ihned nastavit na výškoměru.

V České republice se jako jednotka atmosférického tlaku používají [hPa], stejně je tlak zobrazován předpovědními modely a stejná jednotka byla použita pro databázi této práce.

3.7 Relativní vlhkost a rosný bod

Relativní vlhkost je udávána v procentech [%] a vyjadřuje poměr aktuálního obsahu vody ve vzduchu a obsahu vody ve vzduchu při jeho plném nasycení (za předpokladu stejné teploty a tlaku). Při dosažení 100% vzduch kondenzuje a padá ve formě srážek k zemi. Teplota tohoto jevu se nazývá rosný bod, udává se ve [°C] a je zobrazován ve zprávách METAR spolu s teplotou vzduchu. Tato informace je užitečná, pokud má hodnota teploty a rosného bodu malý rozdíl. Při těchto podmínkách může pilot v oblasti letiště očekávat např. mlhu nebo jinou formu zkondenzované vodní páry.

3.8 Výška oblačnosti

Udává výšku, ve které se nachází základna mraků. Jak již bylo zmíněno, zobrazuje jí pouze model ECMWF a portál Meteo.pl. Na větších letištích jsou informace o výšce oblačnosti důležité pro splnění přibližovacích a odletových minim. LSHK ale tuto veličinu neměří, a i přes snahu autora se nepodařilo sehnat přístup k žádným datům, se kterými by mohly být předpovědi této veličiny porovnány. Hodnoty jsou tedy ponechány v databázi pro možné užití v budoucích výzkumech, ve statistické analýze ale nefigurují.



3.9 Horizontální dohlednost

Jak pro VFR provoz, tak pro přístrojové létání má tato veličina velký význam, opět pro dodržení předpisových limitací. Na letišti je její hodnota odhadována pracovníkem LSHK pomocí vizuálních referencí. Pro činnosti letiště tato forma zatím stačí, pro jeho další ambice je ale v budoucnu nutné zavést přesnější formu měření (např. pro měření dráhové dohlednosti).

Dohlednost je opět zobrazována pouze u modelu ECMWF a portálu Meteo.pl. Udává se v jednotkách délky, v Evropě nejčastěji v [km]. Stejnou jednotku používají LSHK, při velmi snížené dohlednosti se udává v řádu metrů.



4 Sběr meteorologických dat

Pro sběr dat byl využíván přenosný počítač¹⁰ a již zmíněný tabulkový editor Microsoft Excel. Pro každý model byl v programu vytvořen jeden list, první řádek je nadepsán sledovanými veličinami, první levý sloupec zobrazuje datum záznamu předpovědi a datum, pro které je předpověď určena. Ostatní buňky slouží pro zápis dat (viz Obrázek č. 10).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Datum sběru předpovědi - Datum platnosti předpovědi	Teplota[C]	Oblačnost[8s]	Srážky[Mm]	Rychlost větru[m/s]	Směr větru	Rel. Vlhkost[%]	Rosný bod[C]	Tlak [hPa]	Zákl. oblačnost[m]	Dohlednost[km]	
2	2.1.2021 22:00 - 3.1.2021 12:00	3,00	1	0,90	3,00	V	91,00%	1,00	1012,00	500,00	3,80	
3	3.1.2021 14:00 - 4.1.2021 16:00	4,00	1	0,40	3,00	SV	92,00%	2,00	1014,00	700,00	9,40	
4	4.1.2021 18:00 - 5.1.2021 8:00	1,00	1	0,10	4,00	S	95,00%	0,00	1014,00	100,00	14,50	
5	5.1.2021 19:00 - 6.1.2021 12:00	1,00	1	0,70	1,00	Z	92,00%	0,00	1011,00	300,00	7,30	
6	6.1.2021 18:30 - 7.1.2021 12:00	0,00	1	1,00	5,00	Z	82,00%	-3,00	1013,00	4800,00	50,00	
7	7.01.2021 18:45 - 8.1.2021 16:00	0,00	1	0,20	2,00	JZ	85,00%	-2,00	1015,00	600,00	27,00	
8	8.1.2021 18:30 - 9.1.2021 8:00	-2,00	1	3,00	1,00	SZ	95,00%	-3,00	1020,00	200,00	14,30	
9	9.1.2021 22:00 - 10.1.2021 12:00	-1,00	1	1,00	1,00	SV	87,00%	-3,00	1025,00	300,00	32,50	
10	10.1.2021 19:00 - 11.1.2021 16:00	-3,00	1/4	0,00	2,00	J	84,00%	-6,00	1022,00	6500,00	49,80	
11	11.1.2021 17:00 - 12.1.2021 8:00	-3,00	1	0,00	4,00	J	65,00%	-9,00	1013,00	800,00	54,50	
12	12.1.2021 22:00 - 13.1.2021 12:00	0,00	1	10,00	6,00	Z	88,00%	-2,00	1010,00	700,00	24,50	
13	13.1.2021 22:00 - 14.1.2021 16:00	-1,00	3/4	1,00	3,00	SZ	87,00%	-3,00	1016,00	600,00	39,70	
14	14.1.2021 20:00 - 15.1.2021 8:00	-3,00	1	2,00	2,00	Z	89,00%	-4,00	1021,00	1200,00	37,90	
15	16.01.2021											
16	16.1.2021 22:00 - 17.1.2021 12:00	-5,00	1/2	0,00	2,00	SV	71,00%	-10,00	1020,00	500,00	44,90	
17	17.1.2021 22:00 - 18.1.2021 16:00	-4,00	1	5,00	0,00		82,00%	-7,00	1022,00	600,00	23,10	
18	18.1.2021 19:00 - 19.1.2021 8:00	1,00	1	0,10	5,00	Z	90,00%	-1,00	1018,00	2200,00	29,20	
19	19.1.2021 18:30 - 20.1.2021 12:00	4,00	1/4	0,00	2,00	JV	80,00%	1,00	1011,00	8100,00	49,60	
20	21.01.2021											
21	21.1.2021 23:00 - 22.1.2021 16:00	6,00	1/4	0,00	3,00	JV	77,00%	2,00	998,00	2300,00	45,60	
22	22.1.2021 20:00 - 23.1.2021 8:00	6,00	1	0,50	7,00	J	85,00%	4,00	992,00	600,00	12,40	
23	23.1.2021 22:00 - 24.1.2021 12:00	1,00	1	2,00	4,00	JZ	84,00%	-1,00	997,00	700,00	10,30	
24	24.1.2021 23:00 - 25.1.2021 16:00	1,00	1	0,00	3,00	Z	70,00%	-4,00	1004,00	2500,00	47,90	
25	25.01.2021											
26	26.1.2021 22:00 - 27.1.2021 8:00	-1,00	1	1,00	4,00	Z	85,00%	-3,00	1016,00	400,00	28,10	
27	27.01.2021											
28	28.1.2021 21:00 - 29.1.2021 12:00	1,00	1	14,00	4,00	V	92,00%	0,00	998,00	600,00	6,40	
29	29.1.2021 23:00 - 30.1.2021 16:00	-1,00	1/2	0,00	2,00	S	70,00%	-5,00	1003,00	X	47,40	
30	30.1.2021 21:00 - 31.1.2021 8:00	-5,00	3/4	0,00	2,00	V	84,00%	-7,00	1007,00	200,00	27,80	
31	31.01.2021 20:00 - 1.2.2021 12:00	3,00	1/2	0,00	4,00	V	22,00%	-17,00	1001,00	X	60,30	
32	1.2.2021 21:30 - 2.2.2021 16:00	3,00	1	0,00	2,00	J	91,00%	2,00	1006,00	2800,00	37,50	

Obrázek č. 10 Ukázka záznamu dat modelu ECMWF v programu Microsoft Excel [autor]

Pokud u data chybí hodnoty, předpověď pro ten den nebyla zaznamenána, nebo chyběla srovnávací data v dokumentech LSHK. Data byla zaznamenávána v jednotkách, kterým je věnována kapitola 3.

Veškeré zápisy byly prováděny ručně, dřívější ambicí bylo navrhnout automatický zápis dat z modelů pro ulehčení průběhu výzkumu, po složitější studii této problematiky bylo dospěno k názoru, že vypracovat podobný program by přesahovalo jak současné programátorské schopnosti autora, tak i rozsah této práce. Navíc je u některých modelů tato možnost ukládání dat zpoplatněna, u modelu ECMWF se jedná o částku ve výši stovek eur.

¹⁰ Jedná se o počítač Macbook-air značky Apple s operačním systémem IOS. Je možné, že se některé internetové stránky budou zobrazovat jiným způsobem uživatelům, kteří využívají operační systém Windows.

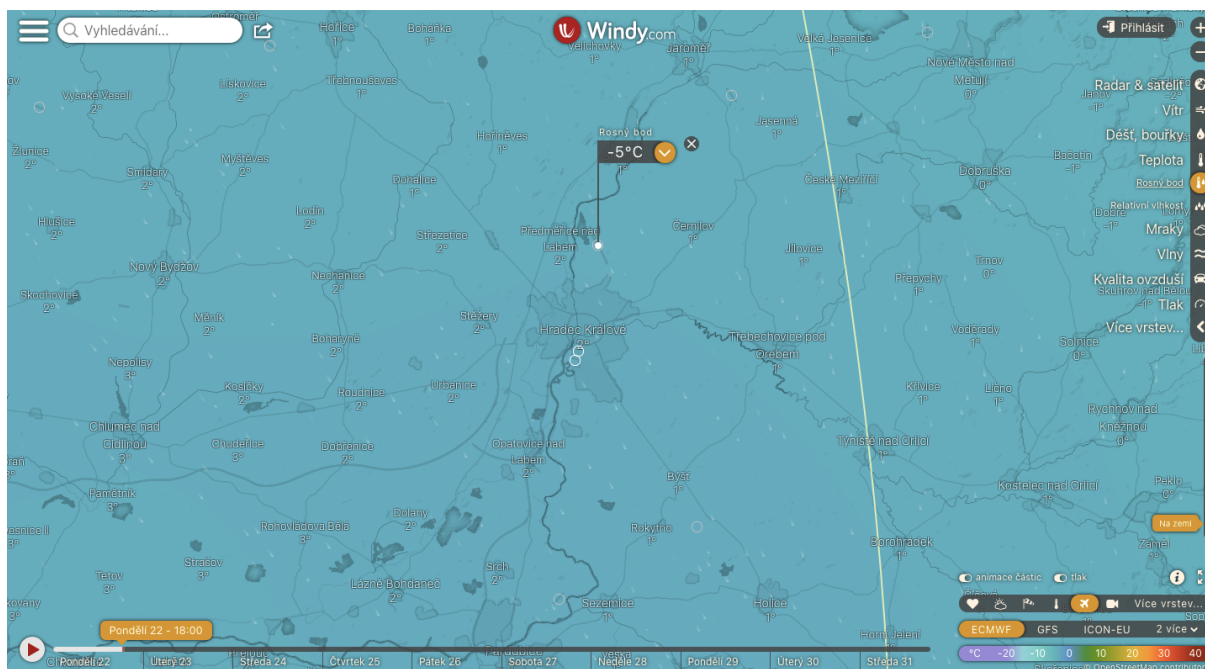
4.1 Windy.com

Velkou pomocí při zápisu předpovědí v průběhu tohoto období byly internetové stránky Windy.com. Jde o hojně využívaný portál, který zobrazuje data z modelů ICON, ECMWF, GFS a NEMS.

Windy.com vzniklo v roce 2014, prvně pod jménem Windyty.com. Šlo o práci jediného člověka, nadšence do počasí a programování, který na jejich internetových stránkách působí jako administrátor a vystupuje pod jménem „Ivo“. Windy.com vzniklo po vzoru již zmiňovaného švýcarského meteoblue.com, v roce 2016 získalo popularitu díky spuštění aplikace pro mobilní telefony. V roce 2017 se tým rozrostl na 5 lidí a během sezóny hurikánů bylo Windy.com zdrojem důležitých informací pro vlády, společnosti a jednotlivce postižených států. [34] Stránky jsou velmi pěkně zpracované, práce s nimi je intuitivní a jednoduchá. Dle mého názoru se jedná o nejpřehlednější zobrazení výstupů výše zmíněných modelů. Internetové stránky používám již delší dobu pro osobní účely a vždy jsem byl s jejich službami spokojený. [34]

4.1.1 Práce s Windy.com

Pomocí obrázku č. 11 je vysvětlen postup práce s internetovými stránkami.



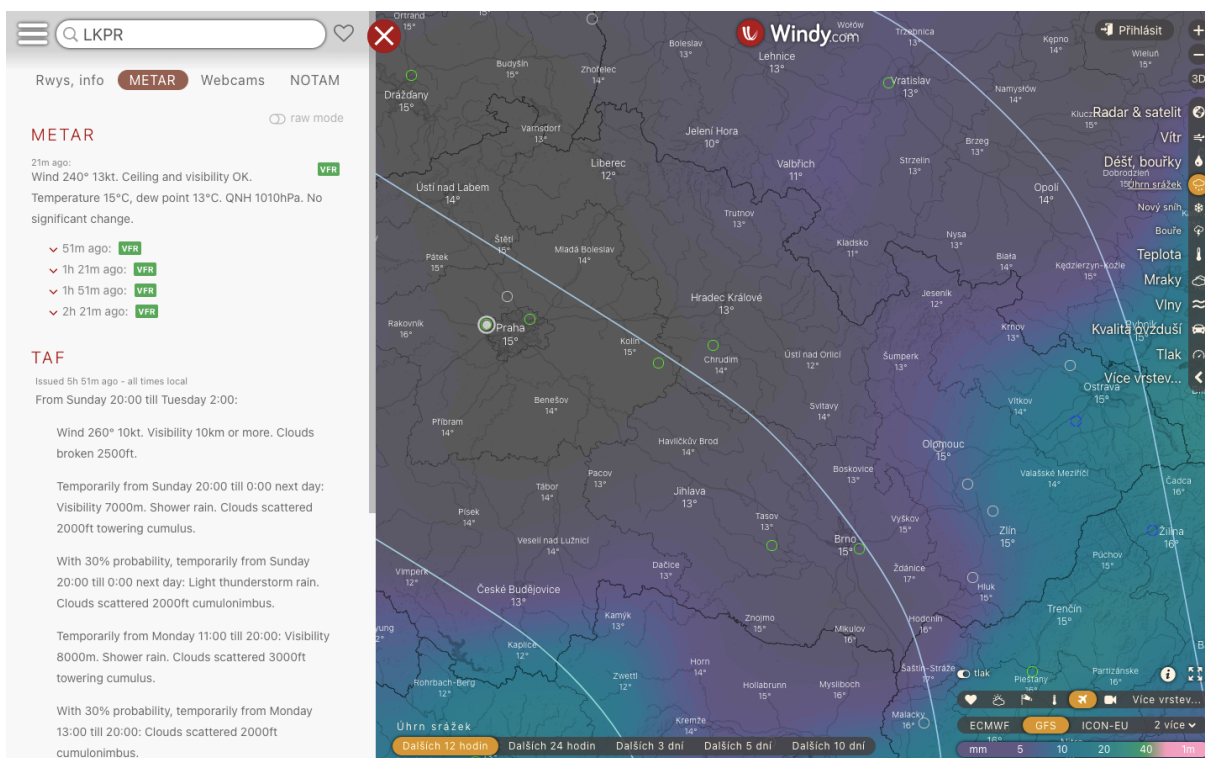
Obrázek č. 11 Ukázka uživatelského rozhraní Windy.com pro model ECMWF [35]



V levém horním rohu můžeme vidět symbol tří čárek, ten otvírá nabídku pro zvolení zobrazených jednotek jednotlivých veličin. Kurzorem viditelným uprostřed obrázku zvolíme žádanou lokalitu a na dolní liště nastavíme datum, pro které si přejeme předpověď zobrazit. Výhodou Windy.com je možnost zvolit přímo polohu letiště, jiné modely nabízí pouze předpověď pro město Hradec Králové. Takto zobrazené hodnoty poté byly po jedné zapisovány do souboru v editoru Microsoft Excel.

Na pravé straně poté můžeme jednotlivě vybírat mezi meteorologickými prvky, v pravém dolním rohu lze přepínat mezi modely. Pod nimi je zobrazena barevně označená legenda zvoleného prvku, v našem případě barvy odpovídají teplotě rosného bodu.

Windy.com také zobrazuje údaje z letišť, které vydávají zprávy METAR a TAF (viz obrázek 12). Nejsou ovšem oficiálním zdrojem, proto jejich použití pro piloty může být pouze doprovodnou informací k oficiálním zdrojům meteorologických informací.

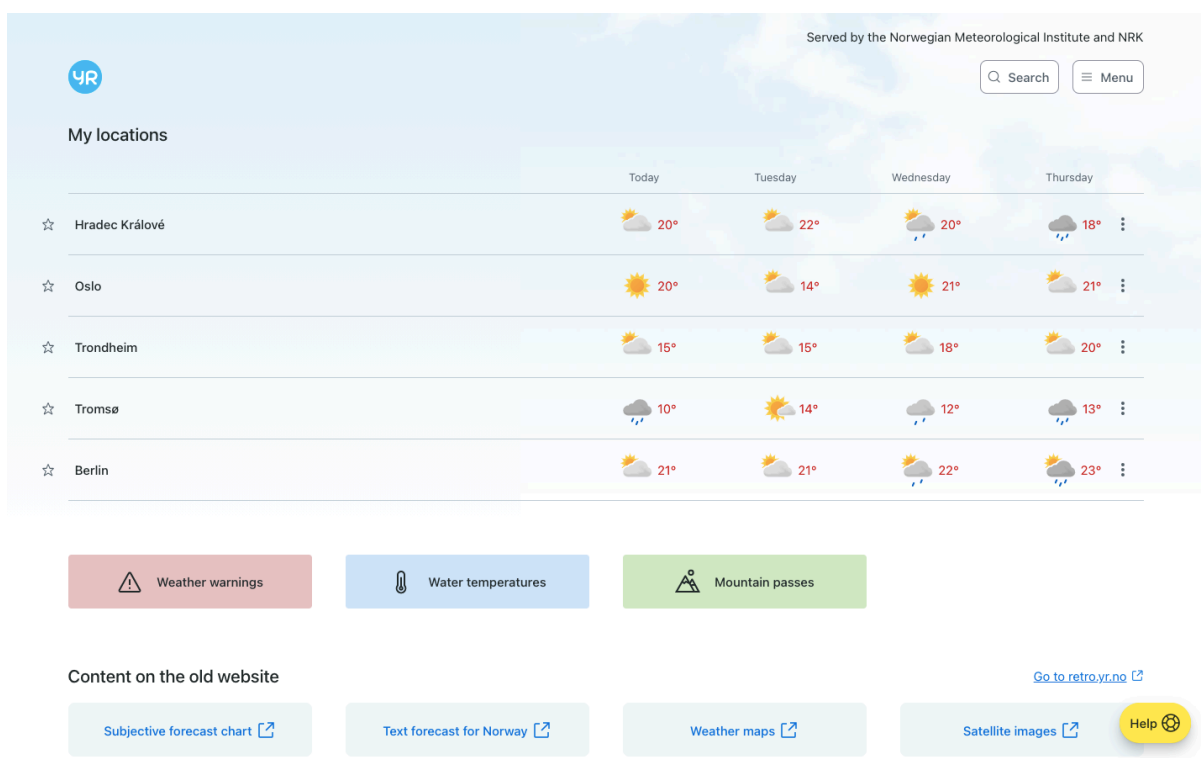


Obrázek č. 12 Zobrazení zprávy METAR a TAF pro LKPR na internetových stránkách [36]

4.2 Práce s Yr.no

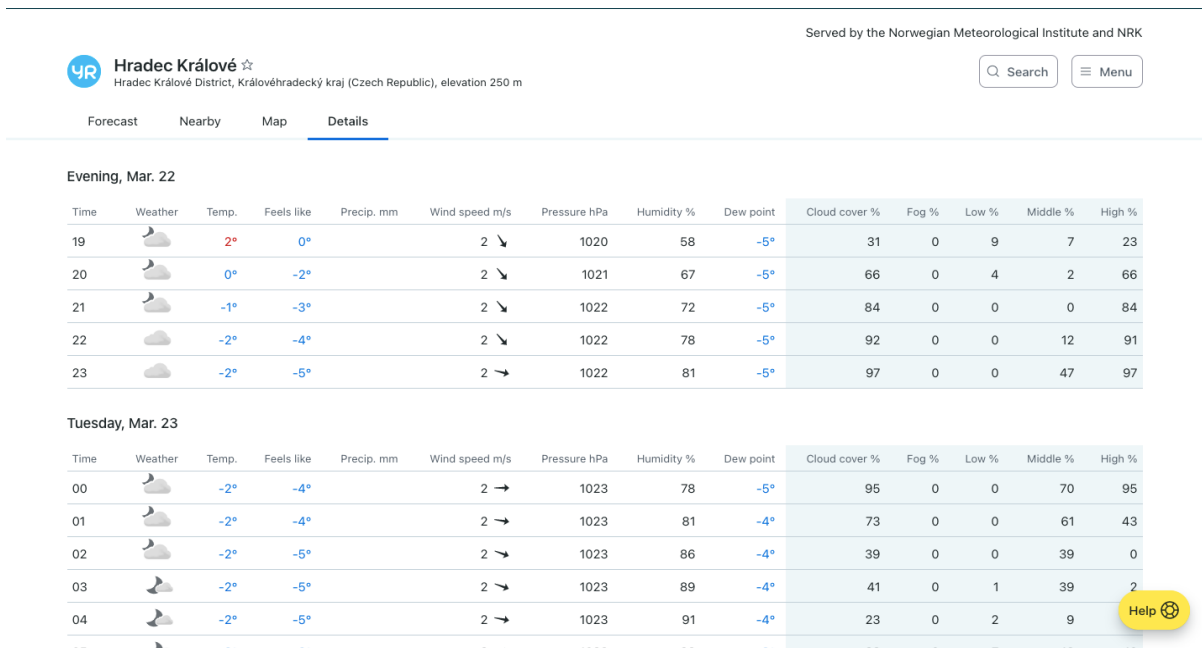
Stránky Yr.no prošly na konci roku 2020 velkou grafickou úpravou, stránky jsou čisté a přehledné, práce s nimi je opět velice intuitivní a jednoduchá.

Na úvodní straně je zobrazena jednoduchá předpověď pro doporučené lokality (Yr.no nabízí Norská města), pamatují si také nejčastěji zobrazovanou předpověď pro Hradec Králové (viz Obrázek č. 13). V pravém horním rohu se opět nachází symbol tří čárek, který otevírá nabídku funkcí. Pomocí nich se otevírá přehled ukázek předpovědí pro hloubku sněhové pokrývky, horské průsmyky, teploty vodních ploch nebo výpis aktuálních meteorologických výstrah. Dále je odtud možné otevřít seznam kontaktů, podporu uživatelů či zvolit jiný jazyk. Nevýhodou pro některé uživatele může být, že stránky postrádají překlad do českého jazyka.



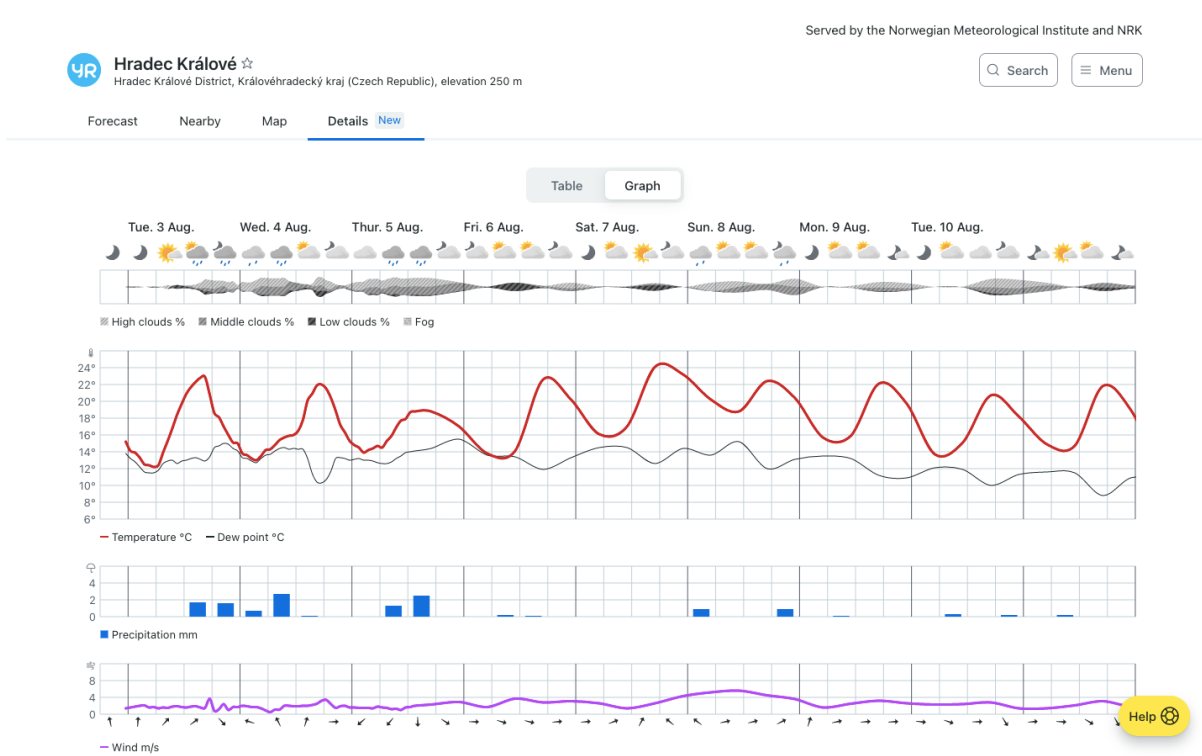
Obrázek č. 13 Úvodní strana internetových stránek Yr.no [37]

Tento norský model opět nabízí přímou volbu lokality (levý roh obrázku č. 13). Bohužel již neumožňuje vybrat lokalitu přesněji, přímo pro letiště. Pomocí tlačítka „Details“ v levém horním rohu (viz obrázek č. 14) otevřeme předpovědi pro zvolené místo. Toto zobrazení bylo použito pro zápis dat do databáze. Tabulka v prvním sloupci zobrazuje čas, poté jsou postupně vyobrazovány jednotlivé meteorologické veličiny. Volba jednotek pro zobrazení na stránkách Yr.no chybí, používají ale stejné jednotky, které byly voleny pro zápis dat tohoto výzkumu.



Obrázek č. 14 Výpis hodinových předpovědí na internetových stránkách Yr.no [38]

Nově také stránky nabízí možnost grafického zobrazení (viz obrázek č. 15), pro výzkum však bylo praktičtější použít zobrazování číselných veličin.



Obrázek č. 15 Grafické zobrazení předpovědi pro Hradec Králové [40]

4.3 Práce s Meteoblue.com

V kapitole 2 bylo zmíněno, že internetový portál Meteoblue.com pro své předpovědi používá model NEMS. Data z modelu NEMS byla získávána z výše zmíněného Windy.com, po rychlém testu ale bylo objeveno, že se data neshodují s daty zobrazovanými na stránkách Meteoblue.com. Z tohoto důvodu byly zavedeny v souboru pro zápis dat dva listy. Jeden pro data z modelu NEMS, která byla získávána přes portál Windy.com, druhý pro data přímo z internetových stránek meteoblue.com.

Na obrázku č. 16 je ukázka předpovědi internetových stránek meteoblue.com. Do předpovědi pro určitou lokaci se dostaneme po vepsání žádané lokace do vyhledávacího okna, které se nachází ve vrchní části snímku.

Meteoblue.com zobrazuje sedmidenní přehled předpovědí. Po rozkliknutí jednotlivých dnů se zobrazí tabulka pod nimi, která již ukazuje předpovědi na jednotlivé časy ve tříhodinových intervalech. Nevýhodou, která nejspíše ovlivní data tohoto zdroje je, že meteoblue.com nezobrazuje 8. a 16. hodinu, ale pouze 9. a 15. Data mají tedy hodinovou nepřesnost ve dvou časových úsecích. Zajímavou vlastností Meteoblue.com je ukazatel předvídatelnosti předpovědi pro jednotlivé dny, ukazatelem je barevná linka ve spodní části denních předpovědí. Dobrá předvídatelnost je značena zelenou barvou, žlutá barva naznačuje předvídatelnost střední a červená předvídatelnost špatnou.

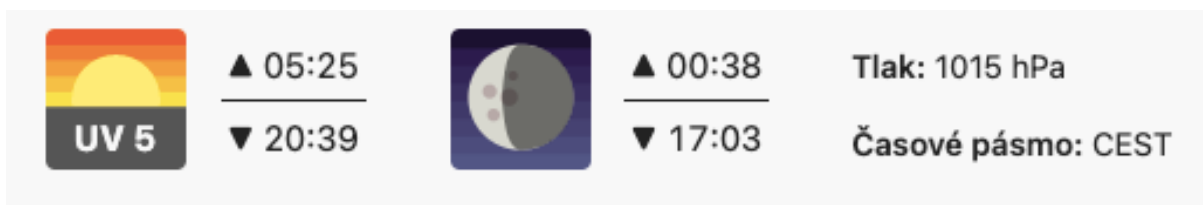


Obrázek č. 16 Ukázka zobrazení předpovědi Meteoblue.com ze dne 2.8.2021 [40]

K volbě zobrazovaných jednotek slouží symbol ozubeného kola v pravém horním rohu. Zobrazování pokrytí oblačností Meteoblue.com řeší grafickými diagramy, které byly následně interpretovány jako osminy.

Zobrazení rainSPOT (dolní část snímku na obrázku č. 16) pro výzkum nebylo využito, ukazuje ale distribuci srážek v okruhu 15 km a může být užitečnou informací pro jiné uživatele těchto internetových stránek.

Další nevýhodou Meteoblue.com je zobrazování tlaku. Tlak je zobrazován na stejné stránce ale níže, pro ukázkou nestačil jeden snímek, proto je ukázka zobrazení tlaku vyfocena zvlášť. (viz obrázek č. 17)



Obrázek č. 17 Zobrazení tlaku na internetových stránkách Meteoblue.com ze dne 2.8.2021

[40]

Tlak je tedy vyjadřován pouze jednou hodnotou, a to pro celý den. To oproti jiným modelům může být značnou nevýhodou. Dopadu této charakteristiky internetových stránek Meteoblue.com je věnován větší prostor v kapitole 5.

Pod údaji o západu a východu měsíce a slunce, tlaku a časovém pásmu Meteoblue.com ještě zobrazuje pětidenní meteogram teploty, srážek a větru. Dalšími informacemi které Meteoblue.com zobrazuje na stejné stránce jsou aktuální satelitní snímky družic EUMETSAT a radarová krátkodobá předpověď pro vybranou lokalitu. Meteogramy ani snímky z družic nebyly ve výzkumu využity, proto práce postrádá jejich ukázky.



4.4 Práce s Meteo.pl

Internetové stránky Meteo.pl jsou nejjednodušší ze všech zmiňovaných. Ve vrchní části (viz obrázek č. 18) internetových stránek je možný výběr mezi modelem UM, který byl využit pro výzkum a modelem WAM, který slouží k předpovědi vln na mořských plochách a pro výzkum neměl žádný význam.

Selekci lokality pro generování předpovědí řeší Meteo.pl ojedinelým způsobem. Vedle zobrazené mapy střední Evropy můžeme vidět čtyři šedá políčka pro zápis souřadnic místa, pro které chceme vygenerovat meteogram předpovědi. Pomocí aplikace Google maps byly zjištěny souřadnice letiště LKHK, souřadnice jsou 50°12' severní šířky a 15°49' východní délky. Po zapsání souřadnic už stačí pouze kliknout na tlačítko „show meteogram“ a v novém okně prohlížeče vyskočí meteogram (snímek meteogramu je viditelný na obrázku č. 19). Před použitím funkce pro generování meteogramu je dobré nahrát nejnovější předpověď. K tomuto účelu slouží tlačítko s diagramem šedé obloukové šipky „load latest forecast“ (viz obrázek č. 18). Tento způsob zápisu ovšem není jediným způsobem pro výběr lokality. Stránky Meteo.pl nabízejí řadu polských měst přímo na úvodní stránce, je možné vybrat také některá hlavní evropská města. Poslední možností je kliknout na proškrtnutý symbol čtverečku na zeměpisné mapě v levé části snímku.

SELECT MODEL

WEATHER FORECAST
MODEL UM
Grid: 4km. Forecast length 60h.

WAVE FORECAST
MODEL WAM
Forecast length 120h.

MODEL UM Grid: 4km. Forecast length 60h. start to : 2021.08.02 12:00 UTC [load latest forecast](#)

METEOROGRAMS | DETAILED MAPS

METEOROGRAMS

Nearest meteorogram on map
input geographical coordinates
N ° ' E ° ' [Show meteogram](#)

POLAND

Białystok	Bydgoszcz	Gdańsk	Gorzów Śląski	Katowice	Kielce	Kraków
Lublin	Łódź	Olsztyn	Opole	Poznań	Rzeszów	Szczecin
Toruń	Warszawa	Wrocław	Zielona Góra			

OTHER COUNTRIES

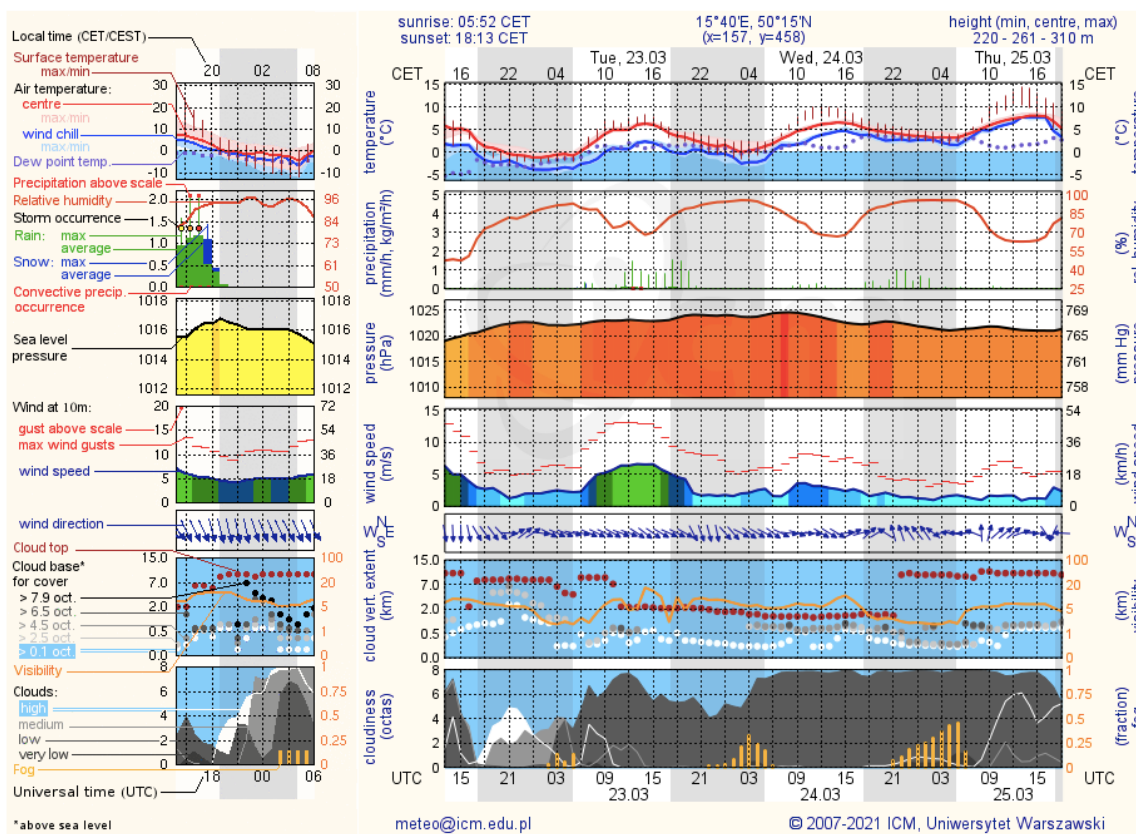
Berlin	Bratislava	Budapest	Copenhagen	Helsinki	Kyiv	Kishinev
Liechtenstein	Ljubljana	Minsk	Oslo	Prague	Ryga	Stockholm
Tallinn	Vienna	Vilnius	Zagreb			

Obrázek č. 18 Zobrazení internetových stránek Meteo.pl [32]



4.4.1 Čtení meteogramů Meteo.pl

Vygenerovaný meteogram (viz obrázek č. 19) je grafickým znázorněním průběhu hodnot meteorologických veličin zobrazených na časové ose. Meteogramy Meteo.pl ukazují předpověď na tři dny dopředu. V levé části je sloupec malých ukázkových meteogramů s vysvětlivkami, ty byly použity pro snadnější orientaci v prostředí grafického zobrazení. Po konzultaci s vedoucí bakalářské práce byl uveden závěr, že jediné veličiny, které se z tohoto modelu použijí, budou výška oblačnosti, pokrytí oblačností a dohlednost. Graf nemá příliš velké rozlišení, to působilo komplikace při zápisu hodnot např. tlaku či teploty. Předpovědi pro tyto veličiny je také dostatek z jiných modelů, naopak předpovědi pro dohlednost či výšku oblačnosti umí z vybraných modelů jen model ECMWF. Proto bylo žádoucí pro tyto veličiny využít alespoň jeden další. Z výše uváděných důvodů musela být následně výška oblačnosti vynechána ze statistické analýzy, její data jsou ale v databázi ponechána.



Obrázek č. 19 Ukázka meteogramu z internetových stránek Meteo.pl [32]



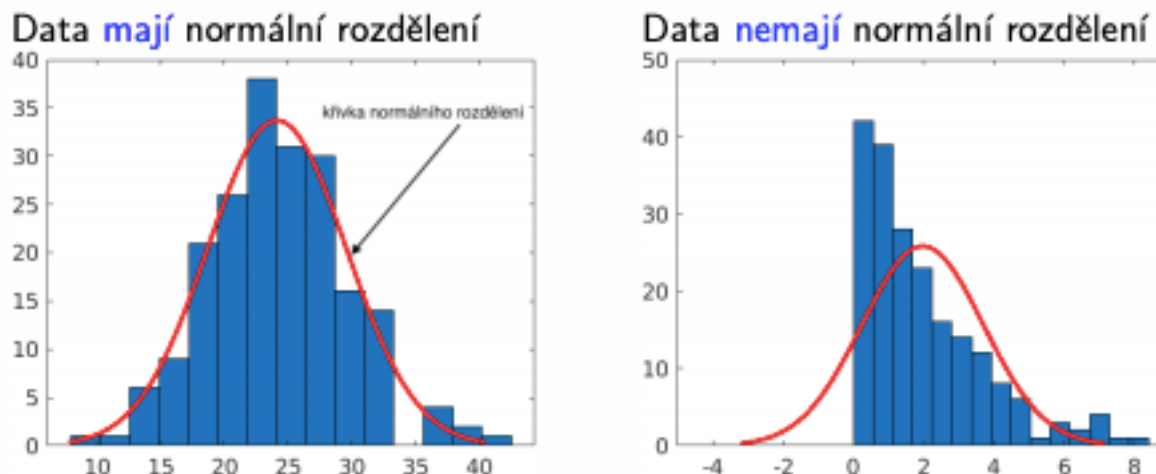
5 Statistická analýza předpovědí

Prvním krokem bylo vyřešit, jak co nejefektivněji porovnat sbírané předpovědi se skutečnými hodnotami pro dané dny z dat získaných od LSHK. V programu Microsoft Excel bylo využito funkce „ABS“, která počítá absolutní hodnotu buňky a následně od sebe byly odečteny sbírané veličiny a nastalé situace z Hradce Králové. Toto bylo provedeno pro každou veličinu. Výsledkem je tedy databáze „chyb“ jednotlivých veličin pro každý model. Jediná aerometrická veličina „směr větru“ byla řešena jiným způsobem. Pomocí funkce „IF“, která testuje, jestli je námi zadaná podmínka pravdivá či nikoliv, bylo porovnáno, jestli byl určitý směr větru předpovězen správně. Pokud ano, v políčku je zapsána hodnota 1, pokud ne, program zapsal 0. Výsledkem je řada logických hodnot, se kterými se dále pracovalo.

Tato data už byla považována za vhodná k importování do výpočetního programu *Matlab* verze *r2019a* (dále jen *Matlab*). Jedná se o program, který je využitelný pro jakoukoliv formu vědecké analýzy. V našem případě posloužil hlavně jeho balíček statistických funkcí. Pro práci s programem byly používány znalosti z předmětů 11MSP (Modelování systémů a procesů) a 11STAT (Statistika), vyučované během studia na FD ČVUT a také internetová knihovna společnosti MathWorks, která stojí za vývojem programu *Matlab*. Další pomocí pro statistickou analýzu byla bakalářská práce studenta Jakuba Kordoše. Po jeho vzoru byla například zpracovávána data v programu Microsoft Excel. [41]

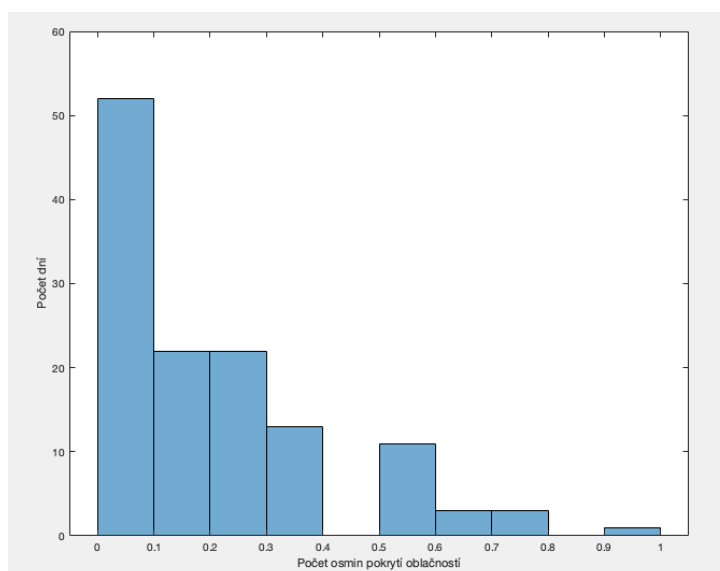
5.1 Normalita dat

Prvním krokem pro statistickou analýzu je určení předpokladu normality. Tento krok je nutné provést kvůli volbě statistických testů, které se základně dělí na parametrické (s předpokladem normality) a neparametrické (bez předpokladu normality). Způsobů určení formy rozdělení je mnoho, pro tuto práci bylo využito grafické metody ověření normality.



Obrázek č.20 Grafická metoda ověření normality [42]

Pomocí programu Matlab byl vykreslen histogram pro každý datový soubor aerometrických veličin jednotlivých modelů, z nich se poté usuzoval výsledek. Na obrázku č. 21 je možné vidět ukázkou jednoho z histogramů.



Obrázek č.21 Ukázkou histogramu dat předpovědi pokrytí oblačností modelu ECMWF [autor]



Porovnáním s obrázkem č.20 můžeme zcela jistě odvodit, že data předpovědí pokrytí oblačností modelu ECMWF nemají normální rozdělení. Tento postup byl proveden pro každý soubor dat a u každého histogramu bylo usouzeno, že data nepocházejí z normálního rozdělení.

5.1.1 Centrální limitní věta

Tato věta říká, že při velkém rozsahu výběru má výběrový průměr přibližně normální rozdělení. V praxi to pro nás znamená, že i když hodnoty velkého výběru nepochází z normálního rozdělení, bude mít výběrový průměr přibližně normální rozdělení. V případě této práce je tedy možné použití parametrických testů, které předpokládají normalitu dat, protože bylo pracováno s velkým množstvím dat (Ústav aplikované matematiky ČVUT považuje za dostatek dat alespoň 30 hodnot). Toto rozhodnutí nám umožňuje použít např. parametrický test ANOVA2 (více v kapitole 5.3). [43]

5.2 Použité pojmy

- *Výběr* – datový soubor, v kontextu této práce se jedná o data aerometrických veličin získaná z předpovědních modelů
- *Skupinový test* – pro výběry o stejném počtu prvků
- *Vícefaktorový test* – test pro výběry, které jsou ovlivňovány více než jedním faktorem
- *Parametrický test* – test který, předpokládá normální rozdělení výběru dat, na který je test aplikován
- *Rozptyl* – také známý jako „střední kvadratická odchylka“, charakteristika variability rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny, vyjadřuje variabilitu souboru náhodných hodnot kolem její střední hodnoty
- *Střední hodnota* – druhá odmocnina rozptylu, její výhodou je, že si zanechává jednotku dat výběr, protože není kvadratická
- *Náhodná veličina* – jakákoli opakovatelně měřitelná veličina podrobena statistickým metodám



- *Nulová hypotéza* – předpokládaný výsledek před provedením testu, pokud není vyvrácena, nezamítá se
- *Alternativní hypotéza* – zpravidla opakem nulové hypotézy, pokud zamítáme nulovou hypotézu, nezamítáme hypotézu alternativní
- *Hladina významnosti (α)* – pro tuto práci bylo standardně použito 5 %, je zvolenou hodnotou pravděpodobnosti, udává interval, podle kterého se zamítá či nezamítá nulová hypotéza
- *p-hodnota* – procentuální hodnota, podle její hodnoty vůči hladině významnosti se rozhodujeme, jestli je výsledek testu zanedbatelný či nikoliv
- *korelace* – závislost mezi dvěma výběry, její hodnotu vyjadřuje korelační koeficient r
- *lineární závislost* – nastává, když je jeden vektor (datový výběr) lineární kombinací jiného

5.3 dvoufaktorová ANOVA

Tento dvoufaktorový test patří k parametrickým testům, které se používají pro testování dat více výběrů (data z modelů). Data pro tento test musejí splňovat alespoň jeden ze dvou požadavků [44]:

1. normální rozložení dat v řádcích a ve sloupcích tabulky s daty
2. stejné rozptyly dat v řádcích a ve sloupcích

Data z modelů splňují požadavek 1. a v kapitole 5.1.1 bylo uvedeno, proč můžeme data tohoto výzkumu považovat za data s normálním rozdělením. Tyto podmínky nám validují použití parametrického testu ANOVA2.

Test byl použit k ověření nulové hypotézy, zda jsou střední hodnoty všech výběrů dat z modelů shodné. Alternativní hypotézou je tedy výrok, že se střední hodnoty dat z výběrů nějakým významným způsobem liší. Výsledkem testu jsou dvě p-hodnoty, jedna pro řádky a druhá pro



sloupce. Hladina významnosti zvolená pro tento test i pro všechny následující byla 5 %. Pokud tedy výsledné p-hodnoty přesahují 0,5, nezamítáme nulovou hypotézu, pokud byla některá výsledná p-hodnota menší než 0,5, nulovou hypotézu zmítáme a potvrzujeme hypotézu alternativní. Tento test byl aplikován pro všechny zkoumané veličiny kromě směru větru, způsob jeho statistické analýzy je popsán v kapitole 5.7.

K testu ověření shody středních hodnot byl použit program Matlab, který má vbudovanou funkci „anova2“. Pomocí zápisu příkazu „`[p, tbl] = anova2(oblacnost_all,1)`“ do příkazového okna Matlab vygeneruje výsledek p-hodnot a tabulku (viz obrázek č.22). [44]

ANOVA Table					
Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Columns	0.5679	6	0.09465	2.4	0.0263
Rows	24.302	126	0.19287	4.89	0
Error	29.7893	756	0.0394		
Total	54.6592	888			

Obrázek č.22 Výstup z testu ANOVA2 pro data o pokrytí oblačností [autor]

P-hodnota tedy vyšla 0,0263, což je méně, než 5 %. Nulovou hypotézu tedy u dat o pokrytí oblačností zamítáme, a potvrzujeme alternativní hypotézu, že se střední hodnoty dat nějakým významným způsobem liší. Stejný postup byl aplikován pro každou veličinu a v tabulce č.1 je přehled výsledků jednotlivých testů:

Tabulka 1: Výsledky testu ANOVA2

	Pokrytí oblačností	Rychlost větru	Srážky	Teplota	Tlak
p-hodnota	0,0263	$3,28649 \cdot 10^{-20}$	$6,29389 \cdot 10^{-5}$	0,0004	0,1669
Nulová hypotéza	Zamítnuta	Zamítnuta	Zamítnuta	Zamítnuta	Zamítnuta

Na základě výsledků ANOVA2 testu bylo usouzeno, že střední hodnoty nejsou stejné. V praxi to znamená, že některé modely mají prokazatelně lepší nebo prokazatelně horší výsledky. Střední hodnoty jednotlivých výběrů se mezi sebou následně porovnají a pro každou veličinu bude označen nejlepší a nejhorší výsledek. Jelikož bylo pracováno s odchylkami (vysvětleno v kapitole 5), čím nižší je střední hodnota výběru modelu, tím přesněji model ukazoval.



Tabulka 2: Přehled středních hodnot výběrů veličin každého modelu

	Pokrytí oblačností	Rychlost větru	Srážky	Teplota	Tlak
ECMWF	0,1871	1,4724	0,6343	1,6882	1,2992
GFS	0,1861	1,5039	0,6508	2,0898	1,3858
ICON	0,1881	1,2521	0,4161	1,8221	1,4646
Meteoblue	0,2215	1,5386	0,3528	1,8063	1,5039
NEMS	0,2569	2,4488	0,3012	2,3024	1,2756
Yr.no	0,2087	1,4961	0,3021	1,6961	1,4016
UM od Meteo.pl	0,1821	-	-	-	-

K minimálním a maximálním hodnotám středních hodnot byly použity funkce programu Matlab „min“ a „max“, které naleznou nejmenší hodnotu vektoru. Nejhorší výsledek je označen oranžovou barvou, nejlepší poté barvou zelenou. Na konci kapitoly 5 se tyto zjištěné charakteristiky ještě objeví v celkovém shrnutí jednotlivých modelů.

5.4 Leveanův test

Druhým stupněm kvality hodnocení předpovědí bylo použití parametrického skupinového testu o shodě rozptylů. Nulová hypotéza tvrdí, že rozptyly všech výběrů jsou shodné. Alternativní hypotézou je opačné tvrzení, že se výrazně liší. Jelikož se jedná o parametrický test, podmínky pro soubor dat zůstávají stejné. Porovnání rozptylů výzkumu ověřuje schopnost modelů předpovídat stabilně po celou dobu výzkumu. Čím větší je hodnota rozptylu (směrodatné odchylky), tím hůře modely předpovídaly. Čím je hodnota nižší, tím stabilnější byla jejich předpověď. [45]

Test se do příkazového okna programu Matlab zadává tímto způsobem:

`„pO = vartestn(oblacnost_all,'TestType','LeveneAbsolute)“ [45]`

Výstupem testu (viz obrázek č.23) je opět p-hodnota podle které byla zamítnuta/nezamítnuta nulová hypotéza a také boxplot¹¹ jehož popsání ukázka je na obrázku č.24).

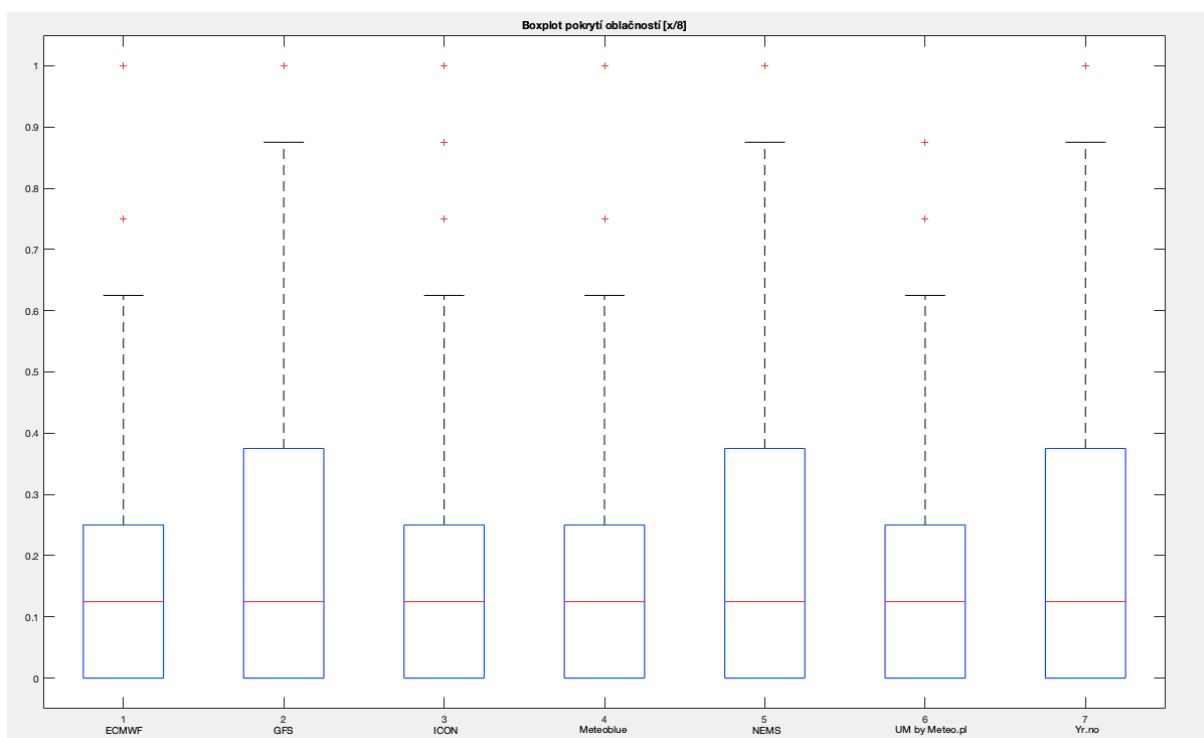
¹¹ Česky „krabicový diagram“ slouží ke grafické vizualizaci numerických dat pomocí jejich kvartilů.



Obrázek č.23 Výstup Leveanova testu z programu Matlab pro předpovědi pokrytí oblačností
[autor]

Group Summary Table			
Group	Count	Mean	Std Dev
1	127	0.18701	0.21297
2	127	0.18602	0.22869
3	127	0.18799	0.23773
4	127	0.22146	0.25059
5	127	0.25689	0.32895
6	127	0.18209	0.20091
7	127	0.20866	0.2525
Pooled	889	0.2043	0.24764
Levene's statistic (absolute)	7.0823		
Degrees of freedom	6, 882		
p-value	0		

Na obrázku č.23 můžeme vidět, že výsledná p-hodnota je 0. Při zvolené hladině významnosti tedy zamítáme nulovou hypotézu, že jsou rozptyly (a směrodatné odchylky) stejné a potvrzujeme hypotézu alternativní, že jsou rozptyly (a směrodatné odchylky) rozdílné. Grafická vizualizace jednotlivých výběrů je zobrazena na obrázku č.24.



Obrázek č.24 Boxplot výběrů dat pokrytí oblačností všech modelů [autor]

Následující kroky byly provedeny pro všechny analyzované veličiny, výsledky Leveanova testu jsou přehledně uvedeny v tabulce č.3.



Tabulka 3: Výsledky Leveanova testu pro všechny analyzované veličiny

	Pokrytí oblačností	Rychlost větru	Srážky	Teplota	Tlak
p-hodnota	0	0	0,0045	0,1373	0,0014
Nulová hypotéza	Zamítnuta	Zamítnuta	Zamítnuta	Zamítnuta	Zamítnuta

U všech veličin byla zamítnuta nulová hypotéza, tedy že jsou rozptyly (a směrodatné odchyly) přibližně stejné. Dalším krokem bude vepsání směrodatných odchylek do jedné tabulky podobně jako u středních hodnot v kapitole 5.3. Z nejvyšších a nejnižších hodnot poté bude vyhodnocen závěr. Použitím směrodatné odchylky namísto rozptylu zachováme jednotku měření (rozptyl je kvadrátem veličiny, směrodatná odchylka je odmocninou rozptylu), a tak budou hodnoty v tabulce lépe představitelné. Směrodatné odchyly také navíc vypisoval program Matlab spolu s p-hodnotou Leveanova testu (viz obrázek č. 23).

Tabulka 4: Přehled směrodatných odchylek výběrů veličin každého modelu

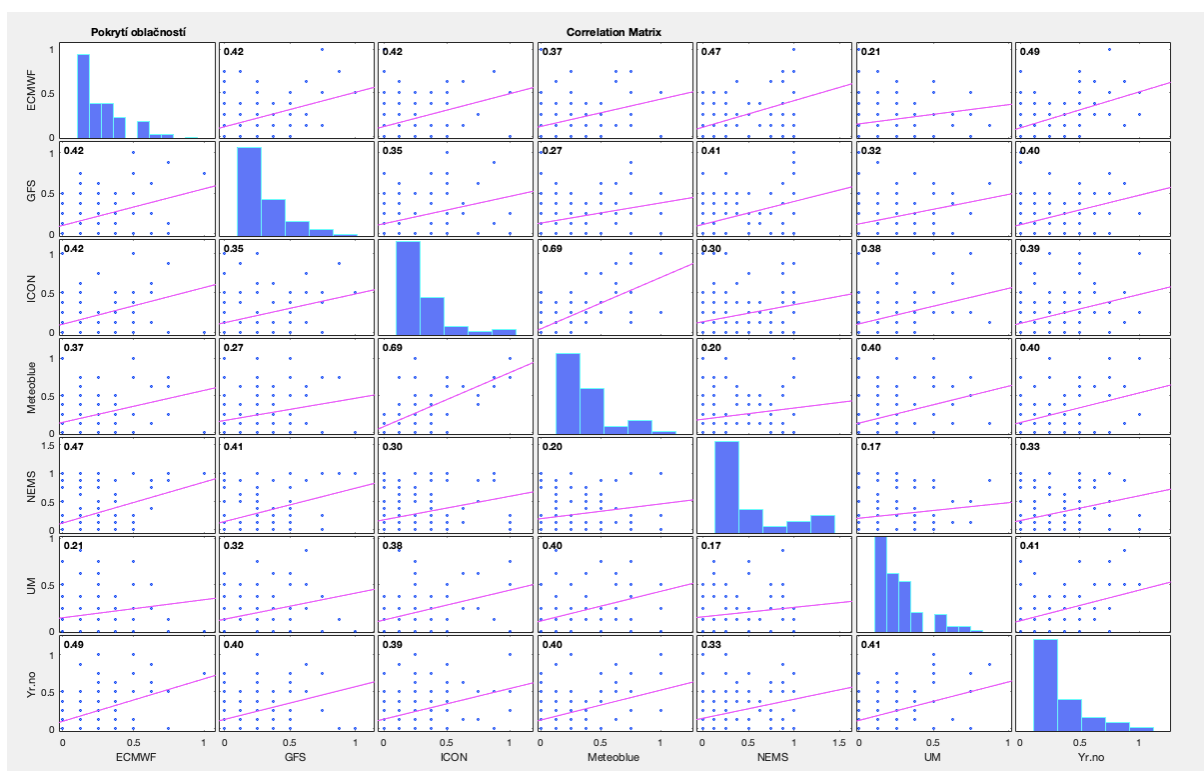
	Pokrytí oblačností	Rychlost větru	Srážky	Teplota	Tlak
ECMWF	0,21297	1,05279	1,5224	1,65978	0,97031
GFS	0,22869	1,11536	1,4889	1,91161	1,0037
ICON	0,23773	1,01159	0,99902	1,78049	1,08229
Meteoblue	0,25059	1,3133	1,03767	1,86167	1,42469
NEMS	0,32895	2,05754	0,96961	2,17389	0,94849
Yr.no	0,2525	1,0569	1,01276	1,92256	1,00995
UM od Meteo.pl	0,20091	/	/	/	/

Z této tabulky je jasně patrné, které modely předpovídali v průběhu výzkumu s pravidelně stabilními výsledky, a které modely měly častější nepřesnosti. Zajímavým poznatkem je, že nejnižší směrodatné odchyly většinou patří modelům, kterým patřily také nejnižší střední hodnoty (tabulka 2), totéž platí pro nejvyšší hodnoty. Neplatí tomu tak u předpovědi srážek, ve které se ukázal nejhorší model ECMWF.

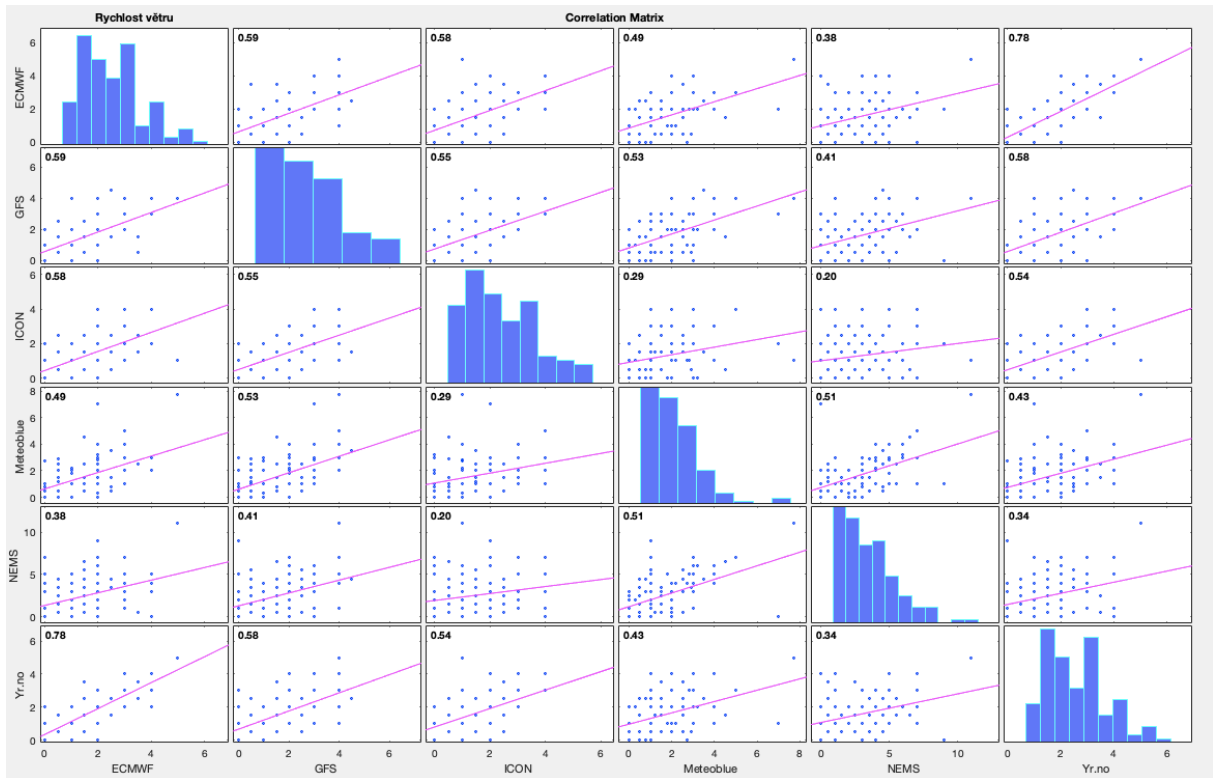
5.5 Test vzájemné korelace

Posledním způsobem, kterým mezi sebou byly porovnány hodnoty odchylek předpovědí je porovnání jejich vzájemné korelace. Cílem tohoto testu je odhalit, které předpovědi se podobají ve svých predikcích. Modely s velkou hodnotou korelace by předpovídaly podobně, tudíž není dobré je používat jako jediné zdroje. Naopak modely s malým stupněm korelace se budou ve svých předpovědích často lišit. [46]

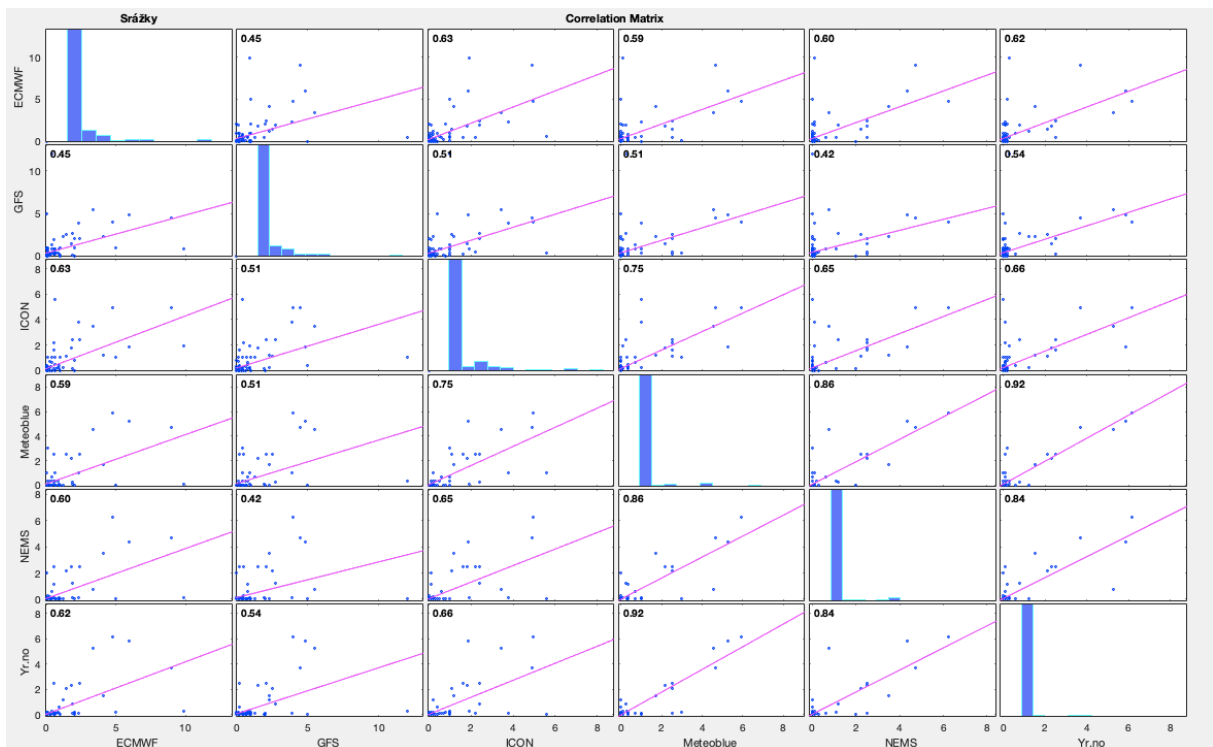
Pro test vzájemné korelace byla využita funkce „plot correlation“ v programu Matlab pro každou testovanou veličinu. Výstupní tabulky této funkce jsou zobrazeny níže. Dále testované korelace byly uvažovány od hodnoty $r = 0,6$ (síla korelace). U slabších korelací je šance na lineární závislost minimální, proto nebyly testovány. Na osách korelační matice (viz obrázek č.25) jsou zobrazeny jednotlivé modely, jednotlivé grafy odpovídají korelacím dvou modelů. V pravém horním rohu každého z grafů je zobrazen korelační koeficient r . Grafy na hlavní diagonále odpovídají histogramu, model v těchto políčkách koreluje sám se sebou. Matice je zrcadlena kolem své hlavní diagonály, výsledky lze tedy číst z obou rohů směrem k diagonále. [46]



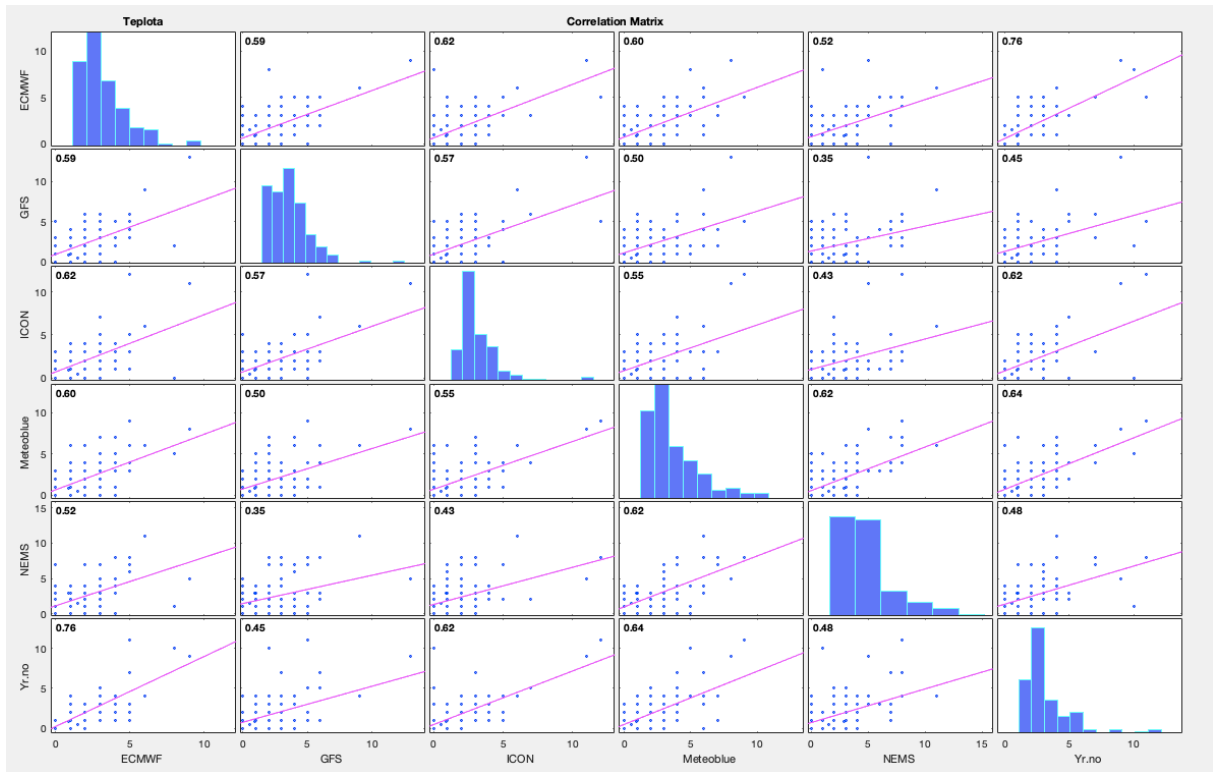
Obrázek č.25 Korelační matice předpovědí pokrytí oblačností [autor]



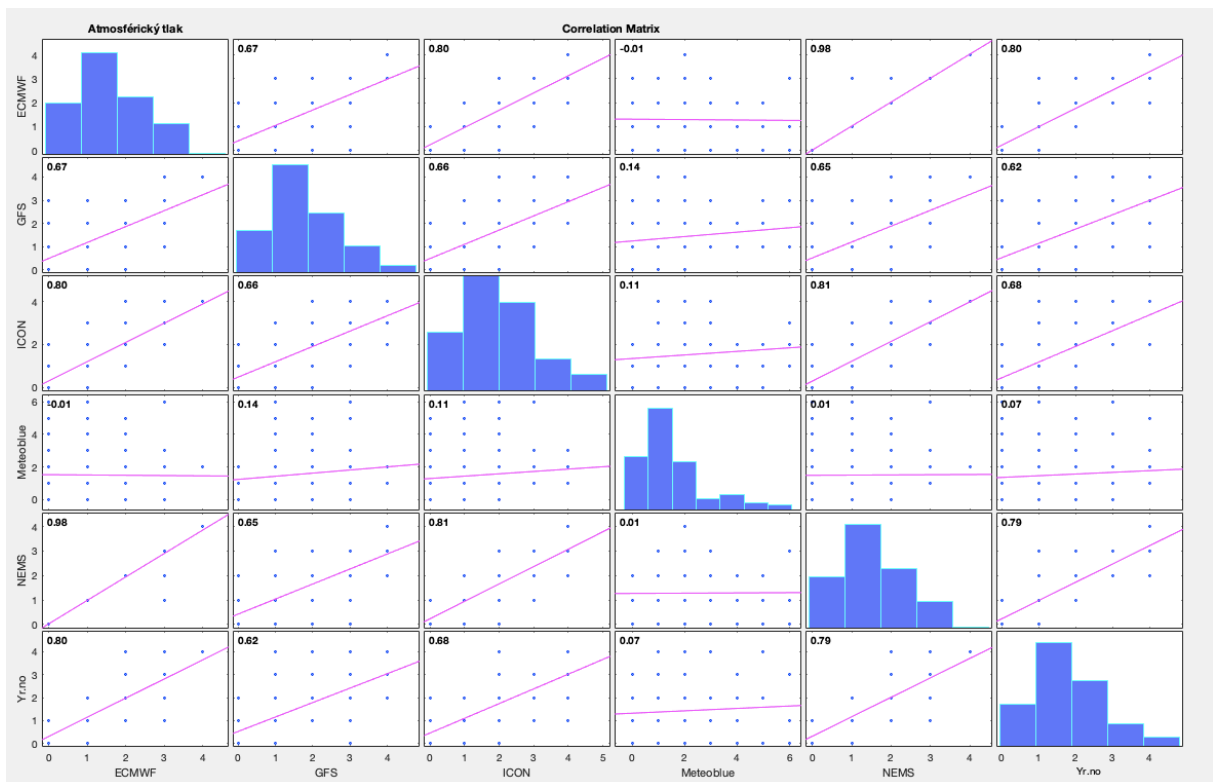
Obrázek č.26 Korelační matice předpovědi rychlosti větru [autor]



Obrázek č.27 Korelační matice předpovědi srážek [autor]



Obrázek č.27 Korelační matice předpovědi srážek [autor]



Obrázek č.27 Korelační matice předpovědi srážek [autor]



5.5.1 Výpis korelací

Zde jsou vypsané korelace modelů s korelačním koeficientem vyšším než $r = 0,6$.

1. Pokrytí oblačností

ICON * Meteoblue

2. Rychlost větru

ECMWF * Yr.no

3. Srážky

ECMWF * ICON

ECMWF * NEMS

ECMWF * Yr.no

Meteoblue * NEMS

Meteoblue * Yr.no

NEMS * Yr.no

4. Teplota

ECMWF * ICON

ECMWF * Meteoblue

NEMS * Meteoblue

Meteoblue * Yr.no

ICON * Yr.no

ECMWF * Yr.no

5. Atmosférický tlak

ECMWF * GFS

ICON * GFS

Yr.no * GFS

NEMS * GFS

ICON * Yr.no



5.6 Pearsonův test

Tento test slouží k ověření lineární nezávislosti dvou vektorů (dat modelů). Jedná se o párový parametrický test pro spojité veličiny. Jak již bylo zmíněno v kapitole 5.1, data z předpovědi této práce nepocházejí ze standardního normálního rozdělení, ale protože je dat dostatečné množství, můžeme je považovat za data z normálního rozdělení. [47]

Do příkazového okna programu Matlab je tento test zapisován tímto způsobem:

```
[PVAL] = corr(ecmwfRV ,yrnoRV , 'Type', 'Pearson')
```

Výstupem je p-hodnota podle které zamítáme / nezamítáme nulovou hypotézu na standardní hladině významnosti 0,5. Nulová hypotéza Spearmanova testu říká, že jsou veličiny nezávislé. Alternativní hypotéza, že nejsou nezávislé. Pokud je tedy p-hodnota větší než 0,5, zamítáme nulovou hypotézu a potvrzujeme hypotézu alternativní, že existuje určitá forma lineární závislosti. Jeden příklad zamítnutí nulové hypotézy je ukázán na obrázku č. 27.

```
>> [PVAL] = corr(ecmwfRV,yrnoRV, 'Type', 'Pearson')
PVAL =
    0.7827
```

Obrázek č.27 Pearsonův test pro předpovědi rychlosti větru modelů ECMWF a Yr.no [autor]

Tímto způsobem byly otestovány veškeré korelace vypsány v kapitole 5.5.1. V tabulce 5 jsou poté vypsány modely u kterých je předpokládána jistá forma lineární závislosti na základě výsledků Pearsonova testu.

Tabulka 5: Modely jejichž veličiny nejsou nezávislé na základě zamítnutí nulové hypotézy

Typ předpovědi	Korelace	p-hodnota	Nulová hypotéza
Pokrytí oblačností	ICON * ECMWF	5,5722*e ⁻¹³	zamítnuta
Teplota	ECMWF * Meteoblue	0,4336	zamítnuta
	NEMS * Meteoblue	0,4389	zamítnuta
	Yr.no * ICON	0,4954	zamítnuta
	Yr.no * Meteoblue	0,4792	zamítnuta



5.7 Analýza předpovědí směru větru

Analýza směru větru byla prováděna pouze použitím logické funkce programu Microsoft Excel „IF“ a zapisovala „1“ pokud model předpověděl směr správně, pokud předpověděl chybně zapisovala „0“. Pomocí funkce „sum“ bylo poté v programu Matlab sečten počet správných předpovědí. Tento postup je velmi citlivý na chyby, je potřeba data z této analýzy brát s rezervou. Také je nutné připomenout, že LSHK často zapisovali vítr slovem „var“, pokud byl proměnlivý. Všechny modely v těchto dnech dostávají od funkce „IF“ hodnotu „0“, jelikož žádný nepředpovídal proměnlivý vítr, pouze jeho exaktní hodnotu.

Tabulka 6: Úspěšnost předpovědi větru pro jednotlivé modely

model	ECMWF	GFS	ICON	Meteoblue	NEMS	Yr.no
počet správných předpovědí	38/127	38/127	34/127	33/127	33/127	39/127
procentuální úspěšnost	29,90 %	29,90 %	26,80 %	26,00 %	26,00 %	30,70 %
pořadí	2 až 3	2 až 3	4	5 až 6	5 až 6	1

5.8 Analýza předpovědí dohlednosti

Data o dohlednosti byla zaznamenávána pouze z modelu ECMWF a modelu UM od Meteo.pl. Žádný jiný model, který byl předmětem výzkumu tento údaj neuváděl. Pro tyto veličiny byly následně provedeny stejné testy jako pro ostatní veličiny, s cílem určit, který z těchto modelů si v předpovědi dohlednosti vede lépe.

Prvním testem byla opět ANOVA2, blíže popsána v kapitole 5.3. Výsledek je ukázán na obrázku č.28.

ANOVA Table					
Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Columns	12996.6	1	12996.6	146.68	0
Rows	11730.9	126	93.1	1.05	0.3907
Error	11164	126	88.6		
Total	35891.5	253			

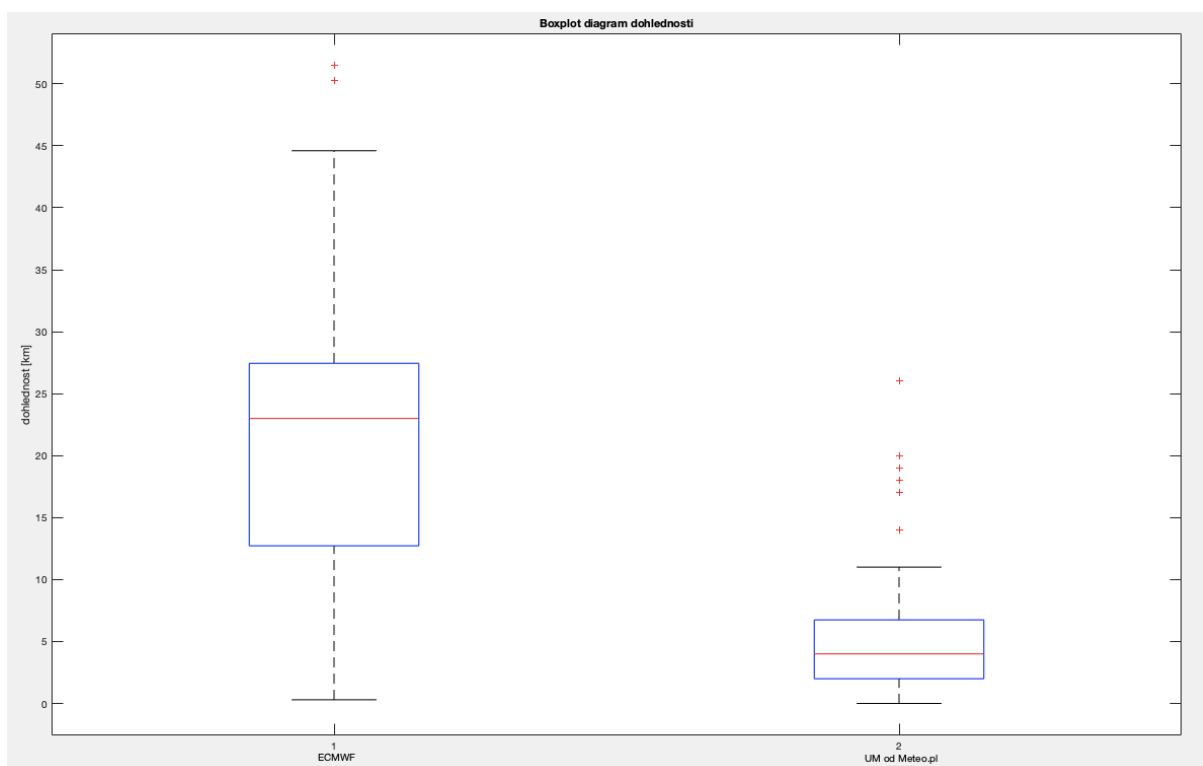
Obrázek č.28 Výstup z testu ANOVA2 pro data dohlednosti [autor]

P – hodnota vyšla nižší než 5 %, tudíž zamítáme nulovou hypotézu a ověřujeme střední hodnoty dat dohlednosti. Výsledky pro testy dat dohlednosti budou následně uvedeny v tabulce 7.

Dalším testem je Leveanův test, blíže popsán v kapitole 5.4. U Leveanova testu byla opět nulová hypotéza zamítnuta, bylo tedy provedeno porovnání směrodatných odchylek. Na obrázku č.29 je ukázán výsledek testu, na obrázku č.30 můžeme vidět grafické znázornění výběrů pro vytvoření představy o jejich distribuci.

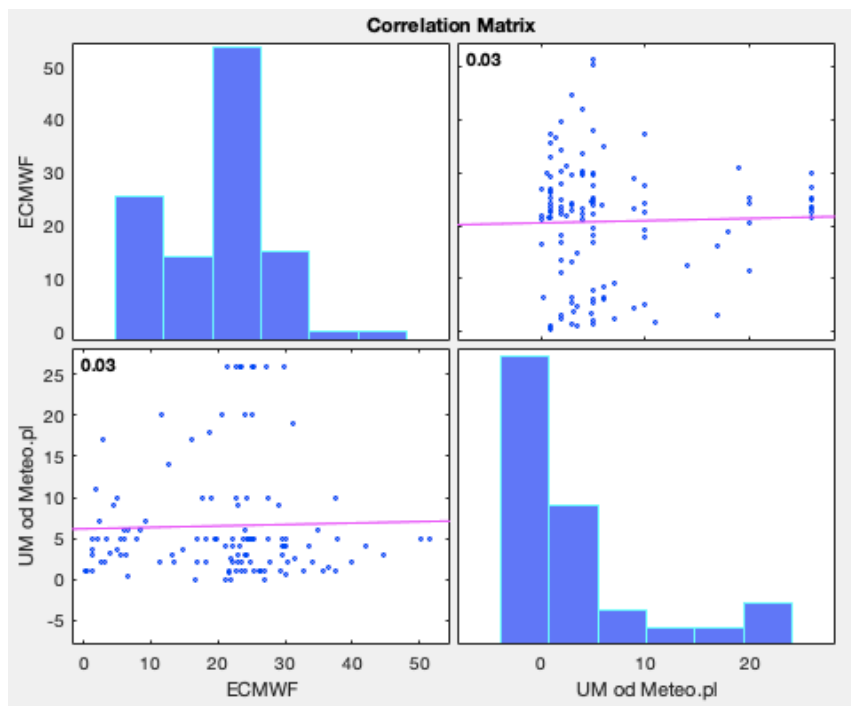
Group Summary Table			
Group	Count	Mean	Std Dev
1	127	20.8276	11.3342
2	127	6.5213	7.2967
Pooled	254	13.6744	9.5317
Levene's statistic (absolute)	22.918		
Degrees of freedom	1, 252		
p-value	0		

Obrázek č.29 Výstup Leveanova testu pro dohlednost z programu Matlab [autor]



Obrázek č.30 Boxplot výběrů dat dohlednosti modelů ECMWF a UM od Meteo.pl [autor]

Posledním testem je test vzájemné korelace. Jak můžeme vidět v korelační matici na obrázku č.31, korelační koeficient vyšel $r = 0,03$. Je téměř jisté, že mezi daty modelů ECMWF a UM od Meteo.pl neexistuje žádná forma lineární závislosti.



Obrázek č.31 Korelační matice předpovědí dohlednosti [autor]

Tabulka 7: Výsledky testů výběrů dohlednosti modelů ECMWF a UM od Meteo.pl

	ANOVA2	Střední hodnota	Leveanův test	Směrodatná odchylka	Korelační koeficient
ECMWF	0,3907	20,8276	0	11,3342	0,03
UM od Meteo.pl	0,3907	6,5213	0	7,2967	0,03

Z výsledků zobrazených v tabulce 7 je jasně patrné, že přesnější a konzistentnější předpovědi poskytoval během sledovaného časového úseku pro oblast letiště Hradce Králové model UM od Meteo.pl.



6 Výsledky statistické analýzy

Testování datových výběrů bylo provedeno pomocí statistického balíčku funkcí programu *Matlab verze r2019a*, tato kapitola obsahuje krátké vyhodnocení zjištěných výsledků.

Pro vytvoření pořadí bylo implementováno „skóre“ modelů. Jelikož je důležité, jak přesně i jak konzistentně modely předpovídaly, obě tyto vlastnosti budou srovnány do jednoho kritéria. Hodnoty z tabulky 2 určují přesnost předpovědí, hodnoty z tabulky 4 zase jejich konzistenci. Díky použití směrodatné odchylky v tabulce 4, která si zachovává jednotku zkoumaných dat, můžeme sečíst hodnoty z těchto dvou tabulek a z nich vyvodit pořadí jednotlivých modelů. Modely s nejnižším „skóre“ předpovídaly nejlépe a nejkonzistentněji, modely s nejvyšším naopak. Pořadí je zobrazeno v tabulce 8. Překvapením je model UM, který oblačnost předpovídal nejlépe. Celkově si nejlépe vedly modely dostupné z windy.com, jmenovitě modely ECMWF a ICON. Potvrdila se také predikce pro model internetových stránek meteoblue, v předpovědi tlaku vycházejí nejhůř. Tento výsledek je příkládán jejich zobrazení jediné hodnoty atmosférického tlaku na celý den. Výsledky také potvrzují rozhodnutí zaznamenávat model NEMS z windy.com a Meteoblue zvlášť, jejich úspěšnost se totiž v každé měřené veličině liší.

Tabulka 8: Pořadí jednotlivých modelů v přesnosti a kvalitě předpovědí jednotlivých veličin

Pořadí	Pokrytí oblačností	Rychlost větru	Srážky	Teplota	Tlak
1.	UM od Meteo.pl	ICON	NEMS	ECMWF	NEMS
2.	ECMWF	ECMWF	ICON	ICON	ECMWF
3.	GFS	Yr.no	Yr.no	Meteoblue	GFS
4.	ICON	GFS	Meteoblue	GFS	Yr.no
5.	Meteoblue	Meteoblue	GFS	Yr.no	ICON
6.	Yr.no	NEMS	ECMWF	NEMS	Meteoblue
7.	NEMS				

Dalším testovaným kritériem byla vzájemná korelace modelů, která značí podobnost jednotlivých předpovědí. Potvrzení určité lineární závislosti vyšlo u předpovědí pokrytí oblačnosti u modelů ICON a ECMWF, u předpovědí teploty mezi těmito modely:

- Meteoblue * ECMWF
- Meteoblue * NEMS
- Meteoblue * Yr.no
- Yr.no * ICON



Tyto modely tedy není vhodné používat v párech jako jediné zdroje předpovědi daných veličin, je dobré předpověď podložit ještě jiným, nezávislým modelem. Jejich předpovědi totiž mohou souhlasit ve správných predikcích, ale také mohou oba modely s větší pravděpodobností předpovídat chybně ve stejný den.

Analýza předpovědí směru větru nepřinesla velmi rozdílné poznatky, úspěšnost jednotlivých modelů se pohybovala kolem 30 %, nejúspěšnější bylo norské Yr.no, druhé místo patří modelům ECMWF a GFS.

Analýza dohledností naopak přinesla poznatek zajímavý, model polské fakulty ve Varšavě UM si vedl o mnoho lépe než model ECMWF. Výsledky jsou viditelné v tabulce 7.

7 Závěr

Předmětem této práce byla analýza současného stavu předpovědi počasí pro letiště v Hradci Králové a poté vyhledat nejlepší alternativy pro tvorbu předpovědí pro danou lokalitu. Následoval sběr dat aerometrických veličin a jejich následná statistická analýza, jejíž účelem bylo vyvodit určitá doporučení pro letecké služby Hradce Králové a jiné uživatele letiště. Po teoretickém úvodu, který byl věnován meteorologickému zabezpečení Hradeckého letiště a popisu jednotlivých používaných modelů, se práce věnovala popisu jednotlivých sledovaných veličin, vysvětlení jednotlivých zdrojů předpovědí a statistické analýze. Informace použité v této práci byly čerpány z různorodé škály internetových a knižních zdrojů, znalostí z předmětů vyučovaných na ČVUT FD a názorů a zkušeností odborníků na tuto problematiku. Statistická analýza databáze předpovědí byla vypracována pomocí programů Microsoft Excel a Matlab verze r2019a. Jejich aplikace byla taktéž detailně popsána.

Původní ambicí práce bylo sehnat srovnávací data od LSHK a pobočky ČHMÚ v Hradci Králové. Kvůli komplikacím, které tento rok přinesl, se autorovi povedlo zajistit pouze místní data z letiště. Dobrým dodatkem k této práci by tedy bylo ještě srovnání s daty od ČHMÚ pro vytvoření věrohodnějšího poznatku a doplnění statistické analýzy o výsledky pro relativní vlhkost a rosný bod. Obě veličiny jsou v letectví významné, ale nebyla sehnána potřebná srovnávací data. Další výtkou k výzkumu může být nezaznamenávání všech aerometrických dat z modelu Varšavské univerzity UM, který se v předpovědích dohlednosti a pokrytí oblačnosti ukázal jako přesný a spolehlivý nástroj, bylo by tedy zajímavé sledovat jeho výkon i v jiných aerometrických veličinách. Kvůli vysoké časové náročnosti výzkumu byl také autor práce schopný zaznamenávat předpovědi pouze pro jednu hodinu na následující den,



zvětšená frekvence zápisu předpovědí by tedy byla dobrým aditivem pro tento výzkum. Jistá forma automatizace zápisu dat z modelů by v tomto případě také určitě výzkum urychlila. Veškeré studované modely se v České republice dají použít pouze jako dodatek k oficiálním předpovědím vydávaným ČHMÚ. I přes tento fakt je dle názoru autora dobré uvádění předpovědi studovat, každý z portálů má své výhody a k vytvoření komplexnější představy meteorologických podmínek mohou být pouze pomocí. Důležitým faktorem pro doporučení předpovědních modelů LSHK byla jednoduchost užívání a efektivita jednotlivých modelů. Pro předpověď dohledností a pokrytí oblačností autor doporučuje polský model UM od Meteo.pl. Nejedná se o nejrychlejší zjištění předpovědi, ale model se ukázal jako velmi kvalitní a konzistentní forma předpovědi těchto veličin. Pro ostatní aerometrické veličiny autor doporučuje internetové stránky windy.com. Stránky zobrazují několik modelů, zejména model ECMWF a ICON, které se dle statistické analýzy ukázaly jako nejkvalitnější a nejkonzistentnější předpovědi. Ideální variantou by bylo pro předpověď každé z veličin používat model s nejlepšími výsledky podle tabulky 8, nicméně tato forma předpovědi by zabrala přílišnou zátěž pracovníkům LSHK. Test vzájemných korelací také potvrdil, že modely ECMWF a ICON nemají žádné závislosti mezi daty svých předpovědí. Pro předpovědi větru lze používat nejspíš každý ze studovaných modelů, rozdíly jsou v této kategorii minimální.

V práci bylo analyzováno několik předpovědních modelů. Sběr dat aerometrických veličin byl prováděn po dobu poloviny roku. V příštích analýzách této problematiky by bylo dobré výzkum prodloužit na celý rok a zahrnout tak všechna roční období, doplnit srovnání s daty od ČHMÚ. Určitě by se také do výzkumu mohly zařadit další numerické modely pro předpověď počasí. Autor práce by na tento výzkum rád navázal ve své diplomové práci.



8 Seznam použité literatury

[1] LETIŠTĚ HRADEC KRÁLOVÉ. [online]. [cit. 2021-7-1]. Dostupné z:

<https://www.letistehradeckralove.cz/>

[2] LSHK. *Letištní řád* [online]. [cit. 2021-7-1] Dostupné z: [https://lshk.cz/wp-](https://lshk.cz/wp-content/uploads/2020/06/Leti%C5%A1tn%C3%AD_%C5%99%C3%A1d_LKHK_Vyd.2_PIP.pdf)

[content/uploads/2020/06/Leti%C5%A1tn%C3%AD_%C5%99%C3%A1d_LKHK_Vyd.2_PIP.pdf](https://lshk.cz/wp-content/uploads/2020/06/Leti%C5%A1tn%C3%AD_%C5%99%C3%A1d_LKHK_Vyd.2_PIP.pdf)

[3] ČESKÁ METEOROLOGICKÁ SPOLEČNOST. *Nová meteorologická stanice na letišti*

Praha-Ruzyně [online]. [cit. 2021-7-2] Dostupné z: <http://www.cmes.cz/cs/node/326>

[4] CAE Oxford Aviation Academy (2014). 050 Meteorology (ATPL Ground Training Series).

Oxford: CAE Aviation Academy

[5] LETECKÉ SLUŽBY HRADCE KRÁLOVÉ. *Počasí a stav ploch* [online]. [cit. 2021-6-28]

Dostupné z: <https://lshk.cz/pocasi-stav-ploch/>

[6] VFR PŘÍRUČKA. *VFR-AD-LKHK* [online]. Dostupné z:

https://aim.rlp.cz/vfrmanual/actual/lkhk_text_cz.html

[7] ČHMÚ. *Historie ústavu* [online]. [cit. 2021-6-29] Dostupné z: [https://www.chmi.cz/o-](https://www.chmi.cz/onas/historie-ustavu)

[nas/historie-ustavu](https://www.chmi.cz/onas/historie-ustavu)

[8] ČHMÚ. *Předpovědi počasí modelu Aladin* [online]. [cit.2021-6-29] Dostupné z:

<https://www.chmi.cz/predpovedi/predpovedi-pocasi/aladin/aladin-mapy>

[9] IN-POČASÍ. *Aladin* [online]. [cit. 2021-6-29] Dostupné z: [https://www.in-](https://www.in-pocasi.cz/model/aladin/)

[pocasi.cz/model/aladin/](https://www.in-pocasi.cz/model/aladin/)

[10] ECMWF. *Who we are* [online]. [cit. 2021-7-2] Dostupné z:

<https://www.ecmwf.int/en/about/who-we-are>

[11] ECMWF. *What we do* [online]. [cit. 2021-7-2] Dostupné z:

<https://www.ecmwf.int/en/about/what-we-do>



[12] ECMWF. Observations [online]. [cit. 2021-7-2] Dostupné z:

<https://www.ecmwf.int/en/research/data-assimilation/observations>

[13] ECMWF. Modelling and prediction [online]. [cit. 2021-7-3] Dostupné z:

<https://www.ecmwf.int/en/research/modelling-and-prediction>

[14] ECMWF. Introduction to chaos, predictability and ensemble forecasts [online]. [cit. 2021-7-3] Dostupné z: <https://www.ecmwf.int/en/learning/training/introduction-chaos-predictability-and-ensemble-forecasts>)

[15] ECMWF. IFS documentation [online]. [cit. 2021-7-3] Dostupné z:

<https://www.ecmwf.int/en/publications/ifs-documentation>

[16] NOAA. Global Forecasting System [online]. [cit. 2021-7-4] Dostupné z:

<https://registry.opendata.aws/noaa-gfs-bdp-pds/>

[17] NCEI. Global Forecasting System [online]. [cit. 2021-7-4] Dostupné z:

<https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-climate-models/global-forecast>

[18] NATIONAL WEATHER SERVICE. FV3: The next step for NOAA's Global forecasting model [online]. [cit. 2021-7-4] Dostupné z: <https://www.weather.gov/news/fv3>

[19] Hu, M., G. Ge, C. Zhou, D. Stark, H. Shao, K. Newman, Jeff Beck, and X. Zhang, 2018: *Grid-point Statistical Interpolation (GSI) User's Guide Version 3.7. Developmental Testbed Center*. Dostupné z: <https://dtcenter.org/community-code/gridpoint-statistical-interpolation-gsi/documentation>, 149 pp.

[20] GFDL. *FV3: Finite-Volume Cubed-Sphere Dynamical Core* [online]. [cit. 2021-7-4]

Dostupné z: <https://www.gfdl.noaa.gov/fv3>

[21] DWD. ICON (Icosahedral Nonhydrostatic) Model [online]. [cit. 2021-7-4] Dostupné z:

https://www.dwd.de/EN/research/weatherforecasting/num_modelling/01_num_weather_prediction_modells/icon_description.html



- [22] DWD. Data assimilation [online]. [cit. 2021-7-4] Dostupné z: https://www.dwd.de/EN/research/weatherforecasting/num_modelling/02_data_assimilation/data_assimilation.html;jsessionid=73661E3EEEB83BB71FCC94F0DAAE9F59.live31082?nn=484268
- [23] METEOBLUE. *About us* [online]. [cit. 2021-7-5] Dostupné z: <https://content.meteoblue.com/en/about-us>
- [24] METEOBLUE. *Multimodel* [online]. [cit. 2021-7-5] Dostupné z: https://www.meteoblue.com/en/weather/forecast/multimodel/hradec-králové_czech-republic_3074967
- [25] YR.NO. Facts about Yr [online]. [cit. 2021-7-5] Dostupné z: <https://hjelp.yr.no/hc/en-us/articles/206550539-Facts-about-Yr>
- [26] NMI. About the Norwegian Meteorological Institute [online]. [cit. 2021-7-5] Dostupné z: <https://www.met.no/en/About-us/About-MET-Norway>
- [27] EUMETSAT. Who we are [online]. [cit. 2021-7-5] Dostupné z: <https://www.eumetsat.int/about-us/who-we-are>
- [28] METEO.PL. Frequently asked questions – Spis [online]. [cit. 2021-7-12] Dostupné z: <https://mapy.meteo.pl/faq/>
- [29] ICM. Data Science Center [online]. [cit. 2021-7-12] Dostupné z: <https://icm.edu.pl/en/about-icm/>
- [30] ICM. Organisation [online]. [cit. 2021-7-12] Dostupné z: <https://icm.edu.pl/en/about-icm/organization/>
- [31] METEO.PL. Frequently asked questions – opis systemu [online]. [cit. 2021-7-12] Dostupné z: <https://mapy.meteo.pl/faq/>
- [32] METEO.PL Numerical weather forecast [online]. [cit. 2021-7-27] Dostupné z: http://www.meteo.pl/index_en.php



- [33] ICAO DOC 9837. *Manual on Automatic Meteorological Observing Systems at Aerodromes* (second edition 2011) [online]. [cit. 2021-7-27] Dostupné z: <http://www.icsc.org.cn/upload/file/20190102/Doc.9837-EN%20Manual%20on%20Automatic%20Meteorological%20Observing%20Systems%20at%20Aerodromes.pdf>
- [34] WINDY. About windy [online]. [cit. 2021-7-27] Dostupné z: <https://community.windy.com/topic/4/about-windy>
- [35] WINDY. Online forecast [online]. [cit. 2021-7-27] Dostupné z: <https://www.windy.com/?50.078,14.458,5>
- [36] WINDY. Online forecast LKPR [online]. [cit. 2021-7-27] Dostupné z: <https://www.windy.com/pois?gfs,rainAccu,49.827,15.071,8,i:pressure>
- [37] YR.NO. My locations [online]. [cit. 2021-7-27] Dostupné z: <https://www.yr.no/en>
- [38] YR.NO Hradec Králové – Details [online]. [cit. 2021-3-22] Dostupné z: <https://www.yr.no/en/details/table/2-3074967/Czech%20Republic/Kr%C3%A1lov%C3%A9hradeck%C3%BD%20kraj/Hradec%20Kr%C3%A1lov%C3%A9%20District/Hradec%20Kr%C3%A1lov%C3%A9>
- [39] YR.NO Hradec Králové – Details – Graph [online]. [cit. 2021-8-2] Dostupné z: <https://www.yr.no/en/details/graph/2-3074967/Czech%20Republic/Kr%C3%A1lov%C3%A9hradeck%C3%BD%20kraj/Hradec%20Kr%C3%A1lov%C3%A9%20District/Hradec%20Kr%C3%A1lov%C3%A9>
- [40] METEOBLUE. Počasí – Hradec Králové [online]. [cit. 2021-8-2] Dostupné z: https://www.meteoblue.com/cs/po%C4%8Das%C3%AD/t%C3%BDden/hradec-kr%C3%A1lov%C3%A9_%c4%8cesko_3074967?day=2



- [41] KORDOŠ, Jakub. *Předpovědi počasí na území Prahy za použití rozdílných předpovědních modelů* [online]. Praha, 2017 [cit. 2021-8-7]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/79999/F6-BP-2018-Kordos-Jakub-Predpovedni%20modely.pdf?sequence=-1&isAllowed=y> Bakalářská práce. Fakulta dopravní ČVUT. Vedoucí práce Iveta Kameníková.
- [42] UGLICKICH. Statistika – přednáška 6 – slajdy [online]. [cit. 2021-8-7]. Dostupné z: http://staff.utia.cas.cz/uglickich/pdfka/slajdy_Pr6_STAT.pdf
- [43] UGLICKICH. Statistika – přednáška 5 – slajdy [online]. [cit. 2021-8-7]. Dostupné z: http://staff.utia.cas.cz/uglickich/pdfka/PrednaskaSTAT5_DISTAN.pdf
- [44] MATHWORKS. Two-way ANOVA [online]. [cit. 2021-8-7]. Dostupné z: https://www.mathworks.com/help/stats/two-way-anova.html?searchHighlight=two%20way%20anova&s_tid=srchtitle
- [45] MATHWORKS. Vartestn [online]. [cit. 2021-8-7] Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/stats/vartestn.html>
- [46] MATHWORKS. Corrplot [online]. [cit. 2021-8-7] Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/econ/corrplot.html>
- [47] UGLICKYCH. Statistika – jak zvolit test hypotéz [online]. [cit. 2021-8-7] Dostupné z: <http://staff.utia.cas.cz/uglickich/pdfka/volbaTH.pdf>