



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Jakub Kordoš

**PŘEDPOVĚDI POČASÍ NA ÚZEMÍ PRAHY ZA POUŽITÍ
ROZDÍLNÝCH PŘEDPOVĚDNÍCH MODELŮ**

Bakalářská práce

2018

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

d ě k a n

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



K621..... Ústav letecké dopravy

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Jakub Kordoš

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 – PIL – Profesionální pilot

Název tématu (česky): **Předpovědi počasí na území Prahy za použití
rozdílných předpovědních modelů**

Název tématu (anglicky): Weather Forecasts in Prague Using Different Prediction
Models

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- Vývoj novodobých meteorologických předpovědí
- Představení využívaných modelů předpovědí a jejich principů
- Využití předpovědí civilním a leteckým uživatelem
- Srovnání konkrétních předpovědí s nastalou skutečností na území města Prahy



- 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: Joint Aviation Authorities Airline Transport Pilot Licence: Meteorology, Jeppesen, Oxford, 2002
Sobota J., Kráčmar J.: Meteorologie, Akademické nakladatelství CERM, Brno, 2002
Bednář J.: Úvod do studia dějů v zemské atmosféře, Portál, s.r.o., Praha, 2003

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

Datum zadání bakalářské práce: **20. října 2017**
(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: **27. srpna 2018**
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

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



prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek, dr. h. c.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Jakub Kordoš
jméno a podpis studenta

V Praze dne 20. října 2017

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi poskytli podklady pro vypracování této práce. Zvláště pak děkuji Mgr. Ivetě Kameníkové za pomoc při výběru tématu, které mě při jeho zpracovávání moc bavilo, za odborné vedení a konzultování bakalářské práce, za trpělivost a za rady, které mi poskytovala po celou dobu mého studia. Dále bych rád poděkoval Mgr. Pavlu Provinskému za významnou pomoc při aplikování statistiky u praktické části. V neposlední řadě je mou milou povinností poděkovat své rodině a blízkým za morální a materiální podporu, které se mi dostávalo po celou dobu studia.

Prohlášení

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

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 10. srpna 2018


.....
Podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

PŘEDPOVĚDI POČASÍ NA ÚZEMÍ PRAHY ZA POUŽITÍ ROZDÍLNÝCH PŘEDPOVĚDNÍCH
MODELŮ

bakalářská práce

srpen 2018

Jakub Kordoš

ABSTRAKT

Předmětem bakalářské práce je předpovídání počasí na území Letiště Václava Havla v Praze. Cílem práce je zjistit, jak fungují moderní předpovědi počasí, zejména za využití numerických modelů. Praktická část se pak zaměřuje na vytvoření důvěryhodné statistiky z dat o skutečných předpovědích jednotlivých modelů a následného zhodnocení jejich přesnosti, stability a vzájemné závislosti.

KLÍČOVÁ SLOVA

Předpověď počasí, meteorologická prognóza, předpovědní model, numerický model, meteorologická veličina, nastalá skutečnost, mobilní aplikace, Praha, Letiště Václava Havla.

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

Faculty of Transportation Sciences

WEATHER FORECASTS IN PRAGUE USING DIFFERENT PREDICTION MODELS

Bachelor thesis

August 2018

Jakub Kordoš

ABSTRACT

This thesis deals with weather forecasting on the territory of Václav Havel Airport, Prague. The aim of the thesis is to find out how modern weather forecasts work, especially using numerical models. The practical part of the work focuses on the creation of reliable statistics from real predictions data of individual models and the subsequent evaluation of their accuracy, stability and interdependence.

KEYWORDS

Weather forecast, meteorological prognosis, prediction model, numerical model, meteorological element, real weather situation, mobile application, Prague, Václav Havel Airport.

Obsah

Obsah.....	5
Seznam použitých zkratek	8
1 Úvod	10
2 Vývoj novodobých meteorologických předpovědí počasí	12
2.1 Definice počasí	12
2.2 Předpovědi počasí	12
2.2.1 Všeobecné předpovědi	13
2.2.2 Speciální předpovědi	13
2.2.3 Výstrahy	14
2.2.4 Synoptické předpovědi	14
2.2.5 Početní předpovědi.....	15
2.2.6 Předpovědi bodové, liniové a regionální	15
2.2.7 Krátkodobé předpovědi.....	15
2.2.8 Dlouhodobé předpovědi.....	17
3 Vývoj meteorologie na území dnešní České republiky	18
4 Metody měření a pozorování	19
4.1 Meteorologické stanice a observatoře.....	19
4.1.1 Činnost meteorologických stanic a observatoří	19
4.2 Distanční metody měření a pozorování.....	20
4.2.1 Meteorologické radary	20
4.2.1.1 Radarová měření v České republice	21
4.2.2 Družicová měření a pozorování	21
4.2.3 Aerologická měření.....	22
5 Numerické modely předpovědí počasí	23
5.1 Aladin	24
5.1.1 Funkce výpočetního počítače	26
5.1.2 Výběr vhodného počítače	26
5.1.3 Zdroje dat	27
5.1.4 Ověřování dat a analýza předpovědi	27
5.1.5 Dlouhodobé předpovědi.....	28
5.2 Meteoblue.....	29

5.2.1	Technologie NMM	30
5.2.1.1	NEMS	30
5.3	Yr.no.....	31
5.3.1	NMI.....	32
5.3.2	EUMETSAT	32
5.3.2.1	Geostacionární družice	33
5.3.2.2	Polární družice	33
5.3.2.3	Pozemní segment	34
5.4	ECMWF.....	34
5.4.1	Předpovídání typu „ensemble“	35
5.4.2	EC-HRES	36
5.5	GFS.....	38
5.5.1	Model atmosférické předpovědi	40
5.5.2	Globální systém pro asimilaci dat (GDAS)	40
5.6	ICON	41
5.6.1	Parametry modelového dvacetistěnu	42
5.6.2	Sledované veličiny a jevy	42
5.6.3	Využití předpovědí	43
5.6.4	ICON-ESM	44
5.6.4.1	Spojené simulace ICON-ESM	44
6	Záznam meteorologických předpovědí – pozorované prvky.....	45
6.1	Teplota	46
6.2	Pokrytí oblačnosti	46
6.3	Úhrn srážek	47
6.4	Rychlost větru	47
6.5	Směr větru	48
6.6	Relativní vlhkost	48
6.7	Atmosférický tlak	49
6.8	Rosný bod	49
7	Průběh záznamů dat.....	50
7.1	Předpovědi modelu Aladin	50
7.2	Předpovědi modelu Meteoblue	51
7.3	Předpovědi modelu Yr.no	53

7.4	Předpovědi modelů ECMWF, GFS a ICON.....	55
7.5	Předpovědi mobilní aplikace Klara.....	58
7.6	Nastalá meteorologická situace	60
8	Zpracování dat.....	61
8.1	Využití statistických testů.....	62
8.1.1	Pojmy	62
8.1.2	Porovnání středních hodnot.....	64
8.1.3	Porovnání rozptylů.....	66
8.1.4	Porovnání vzájemné korelace.....	68
8.1.5	Ověření lineární nezávislosti.....	73
8.2	Alternativní zpracování dat o směru větru.....	78
9	Vyhodnocení.....	79
10	Závěr	82
	Literatura	85
	Seznam obrázků.....	89
	Seznam tabulek	90
	Seznam příloh.....	90

Seznam použitých zkratek

AČR	Armáda České republiky
AMSU-A	Pokročilá jednotka typu A využívající vícekanálový mikrovlnný radiometr
CCM	Centrum pro kontrolu misí EUMETSAT
CNTL	Kontrolní člen ze souboru předpovědí u modelu ECMWF
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
ČVUT FD	České vysoké učení technické, fakulta dopravní
DMSP	Meteorologický obranný satelitní program
DWD	Německá meteorologická služba
ECMWF	Evropské centrum pro střednědobé předpovědi počasí
ESA	Evropská vesmírná agentura
ESMF	Modelování pozemského systému
ENS	Členy o nízkém rozlišení ze souboru předpovědí u modelu ECMWF
EUMETSAT	Evropská organizace pro výzkum meteorologickými satelity
GDAS	Globální systém pro asimilaci dat
GFS	Globální předpovědní systém
GNSS	Globální navigační satelitní systém
GOES	Meteorologická geostacionární družice provozovaná americkým úřadem NOAA
GSM	Globální spektrální systém
HRES	Člen o vysokém rozlišení ze souboru předpovědí u modelu ECMWF
ICON	Numerické předpovídání počasí založené na nehydrostatickém modelu dvacetistěnu
ICON-A/L/O	Model atmosféry/Země/oceánu ICON

ICON-ESM	Systém Země modelu ICON
IFS	Integrovaný předpovědní systém
IT	Informační technologie
MCC	Centrum pro kontrolu misí EUMETSAT
MCR	Institut pro meteorologii, klimatologii a dálkové snímání na univerzitě v Basileji
MSA	Mezinárodní standardní atmosféra
NCEP	Národní střediska pro environmentální předpovědi
NEMS	Systém environmentálního modelování NOAA
NOAA	Národní úřad pro oceán a atmosféru
NOMADS	Národní operační modelový archivační a distribuční systém úřadu NOAA
NMI	Norský meteorologický institut
NMM	Technologie modelování společnosti Meteoblue
NWP	Numerické předpovídání počasí
PÚP	Povětrnostní ústředí Praha
SELČ	Středoevropský letní čas
UTC	Koordinovaný světový čas
ÚCL	Úřad civilního letectví
WMO	Světová meteorologická organizace
YAC	Software spojky v systému ICON-ESM

1 Úvod

Předmětem této práce je pozorování veřejně dostupných meteorologických předpovědí za použití několika odlišných numerických modelů. Po teoretickém úvodu, který zahrnuje obecné seznámení s metodami a historií předpovídání, následuje představení vybraných modelů, jejich princip fungování a působnost.

V praktické části se věnuji záznamu konkrétních jednodenních předpovědí všech pozorovaných numerických modelů pro oblast Letiště Václava Havla v Praze. Po záznamu dat, jejich vložení do tabulkové podoby a výpočtu absolutních hodnot odchylek od nastalých skutečností provádím finální zpracování. To je uskutečněno statistickými výpočty v počítačových programech, kde předemtná data testuji a získávám potřebné výsledky. Na základě těchto výsledků mezi sebou modely následně porovnávám z hlediska přesnosti a stability předpovědí. Modely jsou hodnoceny zvlášť podle jednotlivých sledovaných veličin a následně je nezávisle doporučuji, a to jak pro civilní, tak letecké uživatele, jejichž potřeby jsou odlišné.

Veškeré předpovědi každého z modelů jsem odebíral z veřejně dostupných zdrojů, které dané předpovědi numerických modelů zprostředkovávaly, zejména z mobilních aplikací předpovědních portálů. Při záznamu dat a jejich následném zpracování jsem postupoval vždy maximálně objektivně, data jsem nijak neupravoval a opíral jsem se pouze o skutečné, publikované hodnoty.

K výběru tohoto tématu mne vedlo několik důvodů. V první řadě je to zájem o meteorologii, která je nedílnou a zároveň velmi důležitou součástí osnovy mého studovaného oboru „profesionální pilot“.

V druhé řadě jsem toto téma chtěl prozkoumat také proto, že při leteckém výcviku, který je součástí mých studií, jsem byl zejména ve fázi létání podle pravidel vidu závislý na nastalých meteorologických podmínkách. Často jsem až do dne plánovaného letu nevěděl s dostatečnou jistotou, zdali bude let uskutečnitelný právě z důvodu povětrnostních podmínek. Sledoval jsem

vždy několik zdrojů předpovědí, ale nikdy jsem neměl prakticky ověřeno, které z těchto předpovědí upřednostnit pro vytvoření co nejpřesnější představy o nadcházející situaci. Cílem této bakalářské práce tedy bylo mimo jiné odhalit, který z dostupných numerických modelů by byl jako pomůcka při plánování letu, primárně pro sportovní létání, nejvhodnější.

V neposlední řadě byla prostřednictvím této bakalářské práce naplněna má touha zjistit, který předpovědní portál bych mohl za pomoci svých statistických údajů doporučit blízkým a známým, kteří se mne často tázali, jaký zdroj meteorologických informací je pro jejich potřeby nejvhodnější.

2 Vývoj novodobých meteorologických předpovědí počasí

2.1 Definice počasí

Pojem počasí vyjadřuje projevy přírody a změny v atmosféře, které mají vliv na život na Zemi. Je to souhrn veškerých meteorologických veličin a jevů, které přímo ovlivňují aktuální stav atmosféry. Když mluvíme o meteorologických veličinách, máme tím na mysli např. teplotu vzduchu, tlak vzduchu, či jeho vlhkost. Mezi meteorologické jevy, které rozlišujeme, řadíme mimo jiné mlhy, vichřice a bouřky. Počasí, ať už chceme nebo nechceme, nás každý den ovlivňuje, a to přímo nebo nepřímo. Přímo na nás působí při našem pohybu venku, kdy jsme mu vystaveni, nepřímo má poté dopad na zemědělství, dopravu, energetiku apod. Proto je vhodné využívat v maximální možné míře předpovědi počasí, aby došlo k minimalizaci negativních dopadů projevů počasí pro člověka (Kobzová, 1998).

2.2 Předpovědi počasí

Již přes 150 let se meteorologové zabývají problémem spojeným se zlepšováním metod předpovědi počasí, avšak stále je toto téma předmětem intenzivních výzkumů. V období okolo první světové války byla původní metodika, využívající hlavně empirických vztahů mezi atmosférickým tlakem a projevy počasí, doplněna znalostmi o atmosférických frontách. Pro dnešní určování krátkodobých předpovědí jsou tyto poznatky o vztahu mezi frontami a počasím stále důležitou součástí (Bednář, 2003).

Předpověď nebo také prognóza počasí vyjadřuje odhadovaný budoucí stav atmosféry pro konkrétní území a vychází ze znalostí stavu aktuálního, této znalosti se docílí měřeními a pozorováními. K odhadu nadcházejícího stavu počasí se využívá také znalostí o chování atmosféry v minulosti a vychází se z fyzikálních zákonitostí, kterými se atmosféra řídí, když dochází ke změně z jednoho stavu do druhého (Kobzová, 1998).

Mezi výše zmíněné fyzikální zákonitosti patří například průběh tlaku. Sledování pohybu tlakových útvarů a tvarování izobar je vhodným prostředkem ke spolehlivému předpovídání počasí (CAE Oxford Aviation Academy, 2014).

Hlavním posláním meteorologické předpovědi je vytvoření pravděpodobného scénáře v atmosféře v časovém rozmezí několika hodin, dnů, až týdnů. Dnes se k vytvoření kvalitní předpovědi využívá především matematiky (Šálek, 2013).

Předpověď počasí se využívá k dalším meteorologickým předpovědím a rozlišujeme ji v souladu s několika kritérii podle:

1. účelu, pro který jsou předpovědi vydány – všeobecné, speciální (letecké, hydrologické, zemědělsko-meteorologické) a výstrahy (varující před blížícím se nebezpečným počasím);
2. metody zpracování – synoptické, početní, statistické;
3. území platnosti – bodové, liniové, regionální, předpovědi pro celé sledované území;
4. platné doby – krátkodobé, střednědobé, dlouhodobé (Kobzová, 1998).

2.2.1 Všeobecné předpovědi

V České republice pravidelně vydávané ČHMÚ, obsahují předpovědi teplot, oblačnosti, srážek a jejich typu, informace o průběhu tlaku a větru. Jsou dostupné široké veřejnosti, bývají stručné a vystihují celkovou povětrnostní situaci na daném území, která je příčinou odpovídajícího počasí. Tato situace zahrnuje informace o proudění vzduchu, pohybu front a rozložení tlaku (Kobzová, 1998).

2.2.2 Speciální předpovědi

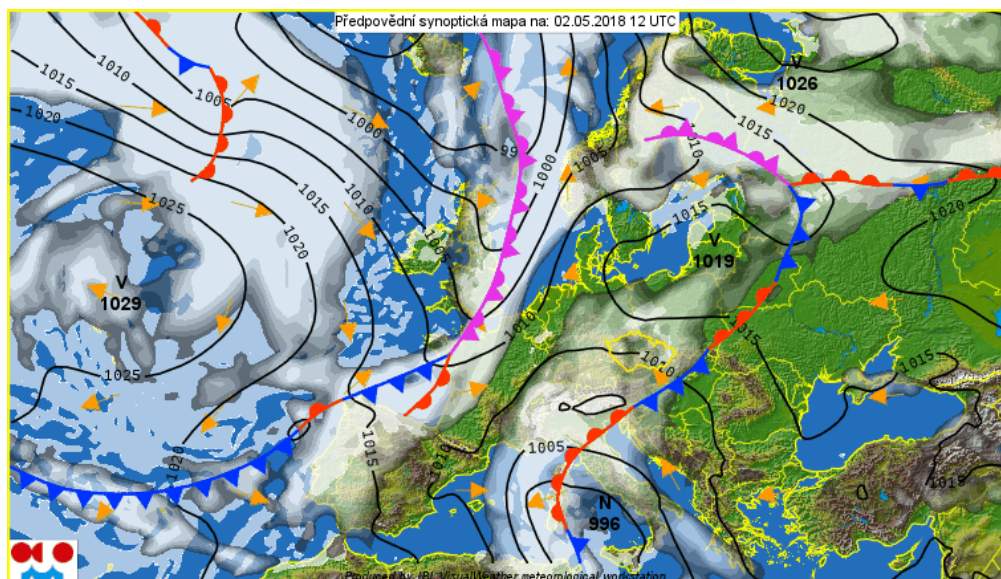
Pro specifické potřeby různých uživatelů se vydávají speciální předpovědi. Jejich obsah se odvíjí od konkrétního požadavku daného oboru lidské činnosti, předpovědi se soustředí na meteorologické jevy, které jsou v těchto jednotlivých oborech obzvláště důležité. Do oborů, které těchto předpovědí využívají, patří zemědělství, vodní hospodářství, energetika, stavebnictví a především doprava – a to hlavně letectví. Letecké předpovědi jsou sestavovány pro zabezpečení plynulého provedení letu, sledují zejména vodorovnou viditelnost, spodní základnu oblačnosti a vítr (Kobzová, 1998).

2.2.3 Výstrahy

Výstrahy jsou specifickým druhem nepravidelných předpovědí, které jsou vydávány v případě, hrozí-li v následujících hodinách na určitém území pravděpodobnost vzniku nebezpečných meteorologických jevů v atmosféře. Nebezpečné jevy jsou takto označovány z důvodu reálné potenciální škody na majetku nebo na zdraví osob. Takovýchto povětrnostních jevů je mnoho, může jít o silný vítr, intenzivní déšť, silnou námrazu, bouřky, krupobití, silné sněžení, ale i laviny a výraznou smogovou situaci (Kobzová, 1998).

2.2.4 Synoptické předpovědi

Metoda synoptické předpovědi pracuje na porovnání za sebou jdoucích analyzovaných synoptických mapách. Na těchto mapách jsou sledovány tlakové útvary a jejich vývoj, postup atmosférických front a vzduchových hmot. Poté se analogicky ze zkušeností o vývoji ovzduší v minulosti a při zahrnutí časové interpolace sestavují předpovědi počasí. Jelikož je ale tato předpověď ovlivněna zkušenostmi a subjektivními znalostmi předpovídajícího meteorologa, je tato metoda označována za subjektivní (Kobzová, 1998).



Obrázek 1: Předpovědní synoptická mapa pro Evropu, 01.05.2018 12:00 UTC (ČHMÚ, 2018d)

2.2.5 Početní předpovědi

Tyto předpovědi jsou výsledkem složitého výpočtu pomocí výkonného počítače, který jako vstupní data do svého matematického modelu vkládá informace o aktuálním stavu počasí. Pro výpočet je potřeba rozsáhlá síť bodů, které pokrývají povrch Země v celé oblasti měření. Pro každý z těchto bodů počítač stanoví hodnoty meteorologických prvků, vychází přitom z informací z pozemních a aerologických stanic. Podle hodnot meteorologických prvků v těchto bodech se díky rovnicím, které popisují chování zemské atmosféry, vypočte odhadovaná hodnota pro následující hodiny až dny. Ve výsledku se tato síť bodů a vypočtených prvků použije jako podklad pro synoptickou předpověď (Kobzová, 1998).

2.2.6 Předpovědi bodové, liniové a regionální

Bodové předpovědi jsou takové předpovědi, které se vydávají pro konkrétní místa o malé rozloze do několika km², například pro letiště. Liniové předpovědi se vydávají pro určité části silnic, dálnic atd. Regionální předpovědi slouží pro potřeby území rozsáhlého až stovek km², území může být stanoveno buď geograficky anebo politicky (Kobzová, 1998).

2.2.7 Krátkodobé předpovědi

Předpovědi o platnosti kratší než den, nejčastěji vydávané na dobu několika hodin, nazýváme velmi krátkodobé a využívají se například v letectví. Krátkodobé předpovědi jsou pak ty, které jsou vydávány na 1-3 dny (Kobzová, 1998).

Dříve se pro krátkodobé předpovědi využívala tzv. klasická synoptická metoda, kdy po nashromáždění dat o aktuálním stavu počasí nad rozlehlými zemskými oblastmi se meteorolog k vytvoření prognóz řídil pouze empirickými pravidly a svými zkušenostmi. S postupem času je tato metoda, která je velmi subjektivní, nahrazována modely, tvořenými matematickými rovnicemi, které popisují základní termodynamické a hydrodynamické stavy v atmosféře. Po dosazení do těchto rovnic za využití znalosti stavu aktuálního počasí a následné časové integraci lze získat hodnoty prognóz pro nejdůležitější meteorologické veličiny.

S druhou polovinou 20. století se v oblasti meteorologie objevily nové možnosti předpovídání počasí. Při nástupu výkonných počítačů, které jsou schopné zpracovávat velké množství dat

a počítat i náročné soustavy diferenciálních rovnic, se ještě za pomoci informací získaných z umělých družic o stavu atmosféry na Zemi v daném čase postupně přecházelo od subjektivních metod předpovídání k metodám objektivním. Ty měly samozřejmě mnohem větší úspěšnost než prognózy stanovené subjektivním odhadem meteorologem, jenž je omezen pouze na své znalosti a zkušenosti, které nemají potenciál se příliš dále rozvíjet. Oproti tomu výpočty vhodnými matematickými a fyzikálními metodami využívající moderní technologie si zakládají na znalostech o reálných vlastnostech zemské atmosféry a pomocí matematických modelů atmosféry jsou schopny přesnějšího odhadu bez ohledu na lidský faktor, který přináší onu subjektivitu a s sebou i zdroje chyb.

Tento způsob, zahrnující velmi výkonnou počítačovou techniku, však vyžaduje využití matematiky, dokonce i pro nejjednodušší modely prognóz jsou zapotřebí poměrně komplikované rovnice. Komplikovanější a pro meteorologii zároveň praktičtější metody zahrnují soustavy parciálních diferenciálních rovnic nelineárního typu. K integraci těchto metod se využívá numerické matematiky, načež v tomto postupu je nutno zavést počáteční podmínky, které mají v meteorologickém odvětví podobu změřených atmosférických stavů v době, od které se předpověď počítá. Tímto bodem tedy novodobé objektivní metody navazují na ty klasické, synoptické metody.

Nejdůležitějšími prvky, které měříme v atmosféře, jsou teplota, tlak, vlhkost, směr a rychlost větru, případně oblačnost, srážky, dohlednosti apod., proto jim je věnována největší pozornost ze stran meteorologů.

Již před dvěma sty lety existovaly v Evropě observatoře, sledující stav a vývoj počasí. V současné době takových observatoří funguje ve světě několik tisíc.

Třicátá léta dvacátého století přinesla nový vynález – radiosonda. Radiosonda jakožto zařízení měřící potřebné údaje z atmosféry nad konkrétním místem pomocí přístrojů vynášených do vzduchu balonem, doplňuje pozorování ze země pozorováním přímo z volné atmosféry. Aktuálně se na světě nachází několik stovek stanic s balonovými radiosondami (v České republice je to například Praha-Libuš).

Informace o meteorologické situaci lze získat z velmi dobře propracovaného systému sdílení povětrnostních zpráv z různých meteorologických stanic všude po světě. I přes tuto možnost celosvětové výměny dat tyto metody pozorování nejsou úplně dostačující, jelikož lokality k měření ze země nepřístupné, jako jsou například oceány, nejsou tímto klasickým pozorováním pokryty.

Proto byla nutnost přijít na nový způsob zjišťování povětrnostních podmínek, kterou částečně vyřešily meteorologické družice. Ty jsou vypouštěny na oběžnou dráhu Země už od roku 1960 a jejich technologické vybavení se neustále vyvíjí kupředu. Z původních družic bylo možné získat snímky oblačnosti, poté se vybavení sond rozšířilo o možnosti jako například měření vertikálního průběhu teplot či radiační poměry mezi Zemí a atmosférou. V kombinaci s klasickými postupy pozorování se tyto družice staly velmi důležitým prvkem pro měření fyzikálního stavu zemské atmosféry, slouží pro příklad ke zlepšení přesnosti krátkodobých předpovědí týkajících se srážek.

Nejmodernější prostředky však nezajistily zcela objektivní postupy krátkodobých předpovědí, konečné prognózy jsou výsledkem spojení objektivních a subjektivních metod měření počasí. Objektivními postupy se získávají informace o povětrnostní situaci, a to hlavně ve volné atmosféře. Na druhou stranu je zde stále subjektivní člen, tj. meteorolog, který zanalyzuje fyzikální stav atmosféry v daném čase a odhadne vlastní prognózu počasí – teplotu, srážky, oblačnost, rychlost větru, jeho směr aj.

Nyní můžeme konstatovat, že nejlepších možných předpovědí lze dosáhnout aplikováním fyzikálně-matematických metod na celý postup prognózy. Aby bylo možné tohoto stavu dosáhnout, je nutností ještě hlouběji pochopit fyzikální podstatu fungování atmosféry, což zahrnuje děje typu transformace tepla v atmosféře, pocházející ze slunečního záření, jeho výměny mezi samotnou atmosférou a zemským povrchem, přeměny mezi potenciální a kinetickou energií a v neposlední řadě vznik a zánik tlakových útvarů. Tyto poznatky vedou ke zdokonalení výchozích teoretických modelů atmosféry, což se ve výsledku projeví zlepšením přesnosti předpovědí veškerých meteorologických prvků (Bednář, 2003).

V dnešní době krátkodobé předpovědi dominantně obstarávají numerické modely, kterých existuje celá řada a provozují je organizace z celého světa (Šálek, 2013).

2.2.8 Dlouhodobé předpovědi

Dlouhodobé předpovědi jsou takové předpovědi, které jsou vydávány s platností na dobu delší deseti dnů. Mezi krátkodobé a dlouhodobé předpovědi patří navíc tzv. střednědobé předpovědi, jejichž platnost je stanovena na 4-10 dnů (Kobzová, 1998).

Záležitost dlouhodobých předpovědí je jednou z největších výzev dokonce i pro současnou meteorologii. Dosud ještě nejsme schopni spolehlivě předurčit vývoj povětrnostních podmínek na delší dobu dopředu, i když několik metod předpovídání počasí na měsíc dopředu a více

ve skutečnosti existuje. Tyto prognózy mají nevyrovnané výsledky, nejsou zkrátka dostatečně přesné.

První z využívaných metod dlouhodobých předpovědí aplikuje statistiku. Ta vychází z rozsáhlých meteorologických pozorování a sběru dat z minulosti na konkrétních místech na Zemi, na základě kterých se snaží odhadovat možnou nadcházející situaci za porovnání nastalých situací v historii.

Druhá metoda, která je subjektivní, protože zahrnuje znalosti odborníka – meteorologa, určuje přicházející povětrnostní situaci díky studiu všeobecné cirkulace atmosféry a jejího predikovaného kolísání. Její přesnost je závislá na vědomostech a zkušenostech predikujícího meteorologa.

Toho, že mají důležité atmosférické jevy tendenci se opakovat, využívá třetí metoda dlouhodobé předpovědi. Tento poznatek vede k možnosti předpokládat, s jistou mírou nepřesnosti, budoucí tlakové rozložení a poté určit předpověď na dané období. Nevýhodou je samozřejmě rozmanitost přírody a s tím související nepravidelnost výrazných povětrnostních jevů (Bednář, 2003).

3 Vývoj meteorologie na území dnešní České republiky

Až do počátku dvacátého století neměly čeští vědci výrazný podíl na přínosu světové meteorologii, už jenom kvůli nevýznamnému postavení jejich země v habsburské monarchii. Roku 1752 započalo svoji činnost na území českých zemí první pravidelné systematické meteorologické měření, a to na pražské hvězdárně Klementinum, kde se pravidelně měřily základní meteorologické veličiny jako např. teplota, tlak vzduchu a množství srážek. Se vznikem samostatné republiky roku 1918 nastal vznik i Státního meteorologického ústavu v Praze, který nahradil instituce vedené do té doby z Vídně. Jedním z prvních cílů bylo vystavění nové staniční sítě a s dokončením tohoto úkolu se začaly vydávat předpovědi široké veřejnosti. Dále se začala rozpínat i činnost letecké meteorologické služby pro využití v letecké dopravě, její síť byla mířena primárně okolo nejdůležitějších letových cest. Nutnost vytvoření vlastní klimatografie dala impulz pro vytvoření prvního souboru klimatických map na území nově vzniklé samostatné Československé republiky. Roku 1969 byly založeny dva hydrometeorologické ústavy, Český hydrometeorologický ústav, jehož sídlo se dodnes nachází v Praze, a jeho ekvivalent na Slovensku pod názvem Slovenský hydrometeorologický ústav, sídlící v Bratislavě. Důležitým datem pro meteorologii na našem území je 27.3.1973. Tohoto dne byl v Praze spuštěn provoz Regionálního telekomunikačního centra Světového programu pozorování počasí WMO.

Až do roku 1989 byl vývoj české meteorologie řízen metodami sovětské meteorologické školy, deficit literatury byl kompenzován překlady z ruského jazyka. Mezi instituce, které se podílely na rozvoji české klimatologie, patřil v tuto dobu ČHMÚ, podporovaný vysokými školami a různými výzkumnými ústavy. Vznik České republiky a Slovenské republiky roku 1993 oficiálně rozdělil meteorologii mezi těmito státy, ovšem oboustranný zájem se nezměnil a dosud lze hovořit o úzké spolupráci mezi Českem a Slovenskem v oblasti meteorologie (Vysoudil, 2004).

4 Metody měření a pozorování

4.1 Meteorologické stanice a observatoře

Meteorologické stanice a observatoře spolu tvoří tzv. profesionální staniční síť. V těchto objektech pracují profesionální meteorologové a jejich hlavním úkolem je získávat informace o stavu základních fyzikálních vlastností přízemní atmosféry a sekundárně se zjišťuje i stav znečištění ovzduší a míra radioaktivity. Česká staniční síť ČHMÚ sestávala v roce 2003 celkem z 18 profesionálních stanic (Vysoudil, 2004).

4.1.1 Činnost meteorologických stanic a observatoří

Hlavní činností těchto zařízení, jak již bylo zmíněno, je pozorování a měření konkrétních meteorologických veličin ve stanovených intervalech. Veškeré profesionální stanice mají automatické systémy měření, které fungují nepřetržitě. Výsledky těchto měření jsou automaticky předávány do centrálního počítače v intervalu jedné hodiny. Ty jsou pak využity k sestavení meteorologických předpovědí a sdíleny mezinárodně. Pokud nastane nenadálá změna v počasí – např. bouře, je zpráva odeslána do centrálního telekomunikačního počítače okamžitě, bez prodlevy. Tyto zprávy obsahují varování před nebezpečnými meteorologickými jevy jako jsou bouře, mlhy, krupobití aj. a slouží hlavně veřejnosti a dopravě, jak silniční, tak letecké.

Mezi měřené prvky profesionálních stanic patří zejména teplota, tlak a vlhkost vzduchu, množství srážek, rychlost větru, směr větru a v neposlední řadě také informace o výšce sněhové pokrývky. Pokrytí oblohy oblačností, vodorovná dohlednost, charakteristiky oblačnosti, nebezpečné a nenadálé změny počasí patří do pozorovaných prvků na těchto stanicích (Vysoudil, 2004)

4.2 Distanční metody měření a pozorování

Neodmyslitelnou součástí meteorologického pozorování jsou distanční metody, které doplňují metody pozemní. Mezi distanční metody měření a pozorování patří radarová, družicová a aerologická metoda (Vysoudil, 2004).

4.2.1 Meteorologické radary

Meteorologické radary neboli radiolokátory se v meteorologii používají k identifikaci intenzit srážek v atmosféře a zaznamenávání projevů oblačnosti na rozsáhlém území Země. Princip spočívá v odražení vyslaného radiového vlnění od vodních či sněhových kapiček, krupek ledu, nebo částic v oblačnosti. Radar vysílá krátké pulsy elektromagnetického záření s vysokým výkonem. Část těchto radiových vln se při přítomnosti srážkových částic odrazí zpět na přijímač radaru a podle polohy antény a času mezi vyslaným a přijatým signálem lze stanovit polohu daného tělesa, v tomto případě např. malých vodních kapiček. Na starších radarech jsou pak vidět odrazy na obrazovce pomocí světelných stop, které vystihují rozsah srážek. Na digitálních radarech jsou data zobrazována na počítačovém monitoru a umožňují vykreslit přesnější obraz radarových odrazů v několika horizontálních hladinách. Výhody radiolokačního měření oproti pozemnímu spočívají hlavně v mnohonásobně větším oblastním rozsahu a v možnosti zjišťování počasí prakticky v reálném čase. Na druhou stranu poskytují informaci pouze o aktuálním rozložení srážek či oblačnosti, a jelikož jsou srážky typické pro proměnlivost v čase i prostoru, může se skutečný stav velmi rychle měnit a těžko předvídat. Proto není vhodné předvídat dlouhodobý vývoj počasí z této metody měření, ve které s časem narůstá počet chyb a nepřesností. Meteorologické radary jsou tedy vhodné zejména k odhadu momentálního rozložení intenzity srážek na velké ploše a předvídaní vzniku nebezpečných jevů v atmosféře spojených s konvektivní oblačností (bouřky, kroupy). Standardní dosah dnešních radarů využívaných v meteorologii je 100-150 km, přičemž bouřkovou aktivitu je možné zachytit na vzdálenost až 300 km. Sítě takových digitálních radarů byly na území Evropy budovány v 70. a 80. letech (Vysoudil, 2004).

4.2.1.1 Radarová měření v České republice

Území ČR je pokryto měřením dvěma civilními meteorologickými radary, v Brdech na kótě Praha a na Českomoravské vrchovině na kótě Skalky u Boskovic. Tato radarová měření mají dosah až 256 km a probíhají bez přestávky každých deset minut. Data z těchto dvou radarů jsou k dispozici ČHMÚ a PÚP AČR. Jako obvykle, měření z radarů jsou i v ČR využívána primárně pro určení polohy srážek a pro výstrahy před nebezpečnými meteorologickými jevy vznikajícími z konvektivních oblačností (Vysoudil, 2004).

4.2.2 Družicová měření a pozorování

Rozmach kosmických technologií našel uplatnění i v meteorologii. Využívané systémy můžeme rozdělit do tří skupin – automatické umělé družice, které pracují nepřetržitě, pilotovaná kosmická tělesa a orbitální kosmické stanice. Subsystem kosmický a pozemní tvoří dohromady meteorologický kosmický systém. Do kosmického subsystemu zapadá komplex družic, které monitorují atmosféru Země, a také skupina družic sloužící pro telekomunikaci. Subsystem pozemní přijímá a zpracovává meteorologické informace a distribuuje je dalším uživatelům. Meteorologické satelity jsou svými specifickými schopnostmi provozovány pro potřeby sledování a předpovědi počasí. Jsou udržovány jednak individuálně jedním státem, jednak společně skupinami států. Od satelitů pro výzkum krajinné sféry mají tyto satelity vybavení, které nemá příliš velkou rozlišovací schopnost, což je ale pro potřeby meteorologie v pořádku, jelikož přináší zisk snímků v globálním měřítku. Satelity se pohybují po různých oběžných drahách s různými vlastnostmi s různým vybavením. Mezi nejdůležitější ve světě patří tři řady amerických satelitů (NOAA, GOES, DMSP) a navíc ještě řada METEOSAT, kterou spravuje západoevropská agentura EUMETSAT. Informace z poslední jmenované řady může dle smlouvy využívat i Česká republika. Tyto meteorologické satelity patří k těm nejmodernějším, se kterými se dnes můžeme setkat, a pohybují se po geostacionární oběžné dráze, jejich polohy tedy zůstávají vůči zemskému povrchu neměnné (Vysoudil, 2004).



Obrázek 2: Meteorologická družice Metop druhé generace (ESA, 2018)

4.2.3 Aerologická měření

Aerologie je meteorologický obor věnující se pozorování a výzkumu vrstev atmosféry, které není možné měřit ze zemského povrchu. Obor aerologie nemá ve světě příliš výraznou tradici, rozvoje dosáhl až po druhé světové válce. Tato metoda používá balony, radiosondy, či jiná létající zařízení, která mají přístrojové vybavení pro záznam meteorologických veličin. Mezi tyto veličiny patří již zmiňovaný tlak, vlhkost a teplota vzduchu, směr a rychlost větru. Aerologická čidla často měří i další prvky, jako je např. míra ozonu a radioaktivity ve vzduchu. Na českém území se nachází aerologická stanice Praha-Libuš, která patří do sítě aerologických stanic WMO a je v provozu od roku 1967 (Vysoudil, 2004).

Teplotu, tlak a vlhkost vzduchu, směr a rychlost větru počítá třikrát denně, a to v 00, 06 a 12 hodin UTC (ČHMÚ, 2018e).

Celý systém se skládá z pozemního zařízení, radiosondy, balonu, větroměrného systému, antény, přijímacího a vyhodnocovacího pozemního zařízení. Balon vynese radiosondu, jejíž součástí je čidlo pro měření tlaku, teploty a vlhkosti, do vysokých vrstev atmosféry. Požadovaná výška dostupu je alespoň 30 km a celé létající zařízení musí být schopno provádět měření minimálně po dobu 90 minut. K určování polohy a tím i výpočtu směru a rychlosti větru je na radiosondě namontován navigační systém. Pozemní zařízení vybavené přijímačem obdrží informace

o naměřených prvcích prostřednictvím frekvenční modulace v pásmu 400 Hz. Díky křemíkovému mikročipovému kapacitnímu tlakovému čidlu jsou měření velice přesná. V české hydrometeorologické službě se od roku 1992 až dodnes používá systém od finské firmy Vaisala, nosný balon je plněn vodíkem. Na našem území byla první pokusná sondážní měření s vojenskými radiosondami v roce 1946, na letišti Praha-Ruzyně. O dva roky později se v Praze již natrvalo uchytila pravidelná aerologická měření (Vysoudil, 2004)

5 Numerické modely předpovědi počasí

První nápad numerického modelu pro předpověď počasí se zrodil v hlavě Lewise Fry Richardsona, který pro tento model na přelomu dvacátých let dvacátého století vytvořil první jednoduché rovnice. I přes tehdejší absenci jakékoli počítačové výbavy si pan Richardson poradil, když do svých výpočtů zapojil své studenty. Byl přesvědčen, že jeho postup byl ten správný, a proto jej publikoval, i když první předpovědi se od skutečnosti výrazně lišily. Jako počítač si v tu dobu představoval jakýsi amfiteátr o čtyřiceti tisících lidských procesorech s tužkami a papíry, na které by jednotlivě svítil reflektorem a tím určoval pořadí výpočtů. Tyto výsledky by posléze byly posílány potrubní poštou prognostikům, kteří by s nimi dále pracovali. Technologie se však pro uskutečnění těchto myšlenek musela ještě hodně vyvinout.

První realizace modelu pro předpověď počasí se uskutečnila v období po druhé světové válce. Počítač ENIAC, postaven Johnem von Neumannem, bylo potřeba otestovat vhodnou úlohou, kterou dodal Jule Gregory Charney. Jednalo se o rovnice jednoduchého jednovrstvého modelu atmosféry, které tito dva muži společně naprogramovali. Spočítat první předpověď na jeden den trvalo počítači celý měsíc, ale výsledky byly celkem přesvědčivé. Proto se s vývojem počítačů zároveň zdokonalovalo modelové předpovídání počasí, které pomocí počítačů využívalo. Oproti začátkům numerických modelů by ty dnešní, modernější modely, měly vykazovat daleko větší přesnost, samozřejmě stále dochází k průběžným zlepšováním. Dodnes je ovšem stále velmi náročný odhad množství a lokace srážek, zejména těch přívalových, v místních bouřkách (Třípól, 2014).

Numerické modely fungují společně na podobném principu. Aby mohla být sestavena předpověď, musí meteorolog znát hodnoty základních veličin po celé atmosféře, v jakémkoli čase. Docílení této znalosti lze dosáhnout zjednodušením systému Země, kdy je Země rozdělena na mnoho menších oblastí a základní veličiny jsou definovány v těchto oblastech. Atmosféra je systém, který

se řídí fyzikálními zákony, už vyjádřenými pomocí matematických rovnic. Rovnic se v tomto případě využívá několik:

- rovnice pohybu – určuje rychlost ze změn tlaku a vlivů rotace Země,
- rovnice kontinuity – porovnává tlak a hustotu
- stavová rovnice plynu – stanovuje vztah mezi teplotou, hustotou a tlakem
- rovnice zachování energie – řeší změny teploty způsobené ohřevem a ochlazením Země
- rovnice stavu vody – poměřuje skupenství vody

Rovnice jsou velice složité, k jejich řešení se užívají vysoce výkonné počítače. Jako vstupní data slouží měření a pozorování z meteorologických stanic, z družic, ze sond atd. Po vyřešení výše zmíněných rovnic lze vytvořit předpověď počasí. Dnešní numerické modely se liší pouze svými aproximacemi a postupy, jinak jsou všechny založeny na právě těchto základních rovnicích. Různé modely mohou také popisovat navíc i lokální jevy typu turbulence, vlivy pohoří, konvekce aj.

Rozdělit numerické modely můžeme na globální a lokální. Rozlišení globálních modelů dosahuje 25 až 100 kilometrů, s rozsahem až 91 vertikálních vrstev. Globální výpočet se provádí pro celý svět maximálně čtyřikrát denně, standardně v časech 00, 06, 12 a 18 UTC. Lokální modely s rozlišením i pod 10 km navazují na výsledky z modelů globálních, a tím je rozšiřují a zpřesňují, což je jejich výhodou. Ke zpřesnění dochází díky statistickým modelům, které jsou založeny na podrobném klimatologickém pozorování pro konkrétní oblast. Naopak nevýhodou lokálních modelů je fakt, že k výpočtu předpovědi je zapotřebí delší čas, tím, že se nejprve počítá globální model a poté teprve ten lokální, navíc vstupní data již nejsou úplně aktuální. Nakonec s výstupy z numerických modelů ještě pracuje meteorolog, který detailní předpověď vytvoří, a to na základě svých zkušeností a s ohledem na vývoj počasí v dané oblasti (In-počasí, 2018).

Optimistické názory tvrdí, že tyto předpovědi dokážou být spolehlivé až na deset dní dopředu, ovšem zatím je ověřená dostatečná spolehlivost výpočetních modelů stále jen maximálně na tři dny (Dvořák, 2018).

5.1 Aladin

Numerický předpovědní model atmosféry Aladin, určený pro omezené oblasti a na krátkodobé (dvoudenní) předpovědi procesů v atmosféře, pracuje v měřítku s rozměrem řádově 10 až 1 km. Na tomto modelu se pracuje od roku 1991, a to v mezinárodní spolupráci (národních a evropských

projektů) v čele s Météo-France, což je francouzská povětrnostní služba. Na patnáct evropských a afrických států je momentálně zapojeno do vývoje modelu Aladin, přičemž v řadě z nich pracuje model v rutinním provozu. Tento projekt byl původně provozován jako dynamická adaptace výsledků předpovědního modelu ARPEGE. V dnešní době se méně podrobný ARPEGE využívá jako jeden ze vstupů pro podrobnější model Aladin. Nejprve se globální model ARPEGE s rozlišením 15 km vypočte ve středisku Météo-France v Toulouse, jehož výsledky se zašlou členským zemím. Zde dojde ke zpřesnění předpovědí pro konkrétní území pomocí Aladina (ten ve verzi počítané ČHMÚ dosahuje rozlišení 4,7 km. Model Aladin je v České republice jediným oficiálním zdrojem meteorologických dat pro letectví. (ČHMÚ, 2018a).

Model Aladin zajišťuje předpověď počasí v České republice, na jejímž území se o chod stará tým osmi lidí. Jeho principem je co nejpřesněji popsat povětrnostní realitu. Předpověď začíná tím, že se naměří data o aktuálním fyzikálním stavu atmosféry. Základem atmosférického modelu je fyzika mechaniky tekutin, kterou doplňuje popis energetického a hydrologického cyklu atmosféry. Například u predikce slunečního záření, které dopadá na zemský povrch, jde o výpočet radiačního přenosu elektromagnetických vln atmosférou. Zde je potřeba vzít v úvahu plynné složení samotné atmosféry, hlavně obsah vodní páry ve vzduchu a její interakce s oblačnými krystalky a kapkami. Na počasí má však vliv spousta dalších proměnných, jako například zemský povrch – ten se taktéž modeluje, včetně jeho interakce s okolní atmosférou.

Tyto znalosti pak slouží k prognóze počasí tzv. objektivními metodami, což znamená, že veškeré fyzikální údaje o meteorologických jevech se převedou do velice komplikovaných matematických rovnic. Nejedná se tedy o kvadratické rovnice, které je možné vyřešit analyticky, ale o nelineární parciální diferenciální rovnice, pro jejichž výpočet se použije výkonný počítač ve spolupráci s numerickými metodami.

Rozsah oblasti předpovídané modelem Aladin zahrnuje celou Českou republiku a dále sahá do vzdálenosti 2 500 km na východ a na západ a 2 000 km směrem na sever a jih. Okrajová data této oblasti zajišťuje Météo-France se svým řídicím modelem ARPEGE. Sloučení globálního modelu ARPEGE a českého Aladina je řešeno tak, aby byla dostupná předpověď s co nejčerstvějšími daty, a to v co nejkratším čase. Velký důraz se samozřejmě klade na to, aby bylo zachováno dostatečně vysoké rozlišení.

Aladin předpovídá zpravidla na 54 hodin dopředu a po obdržení všech vstupních dat musí být prognóza kompletní do šedesáti minut. Tato hodina zahrnuje samotný výpočet modelu, který trvá asi čtyřicet minut, tvorbu dalších výstupů k zajištění publikace (např. médií) a v neposlední řadě

následného zpracování prognostiky. Na svižnosti zpracování záleží hlavně proto, aby se soubor naměřených informací o povětrnostním stavu dostal co nejrychleji do koncových produktů. Předpověď je denně počítána celkem čtyřikrát po šesti hodinách, a to v časech 06, 12, 18 a 24 hodin UTC (Třípól, 2014).

5.1.1 Funkce výpočetního počítače

Počítač pracuje s trojrozměrnou mřížkou, která je charakterizována mnoha body. Těchto bodů je 540 od východu na západ, 432 od severu na jih a 87 na vertikálním profilu. Ve všech těchto jednotlivých bodech proběhne za jeden časový krok, který je kvantován na 180 sekund, až na 30 000 početních operací. Pro zvládnutí prognóz na 54 hodin se tedy v tomto případě uskuteční 1080 časových kroků, tyto kroky musí být dokončeny do výše uvedených čtyřiceti minut. K takovému náročnému záprahu je zapotřebí vlastnit „superpočítač“, ČHMÚ vlastní počítač typu NEC-SX9, jehož instalace byla dokončena roku 2010. Výpočetní systém vyžaduje dostatečný prostor pro zpracování dat, který zajistí sdílená disková pole s vysokou propustností o vysoké kapacitě přes 100 terabitů. Počítač je doplněn dvěma přístupovými servery a rezervními bateriemi, které jsou v případě výpadku proudu schopné počítač nadále provozovat, a to až dvacet minut. Cena takového systému včetně softwarových licencí a rozšířené pětileté záruky se vyšplhala až na sedmdesát milionů korun (Třípól, 2014).

5.1.2 Výběr vhodného počítače

Při volbě nového počítače je důležité provést výkonnostní testy, aby byla ověřena potřebná rychlost výpočtu, jakožto využitelnost paměti, rychlost čtení, rychlost zápisu na disk apod. Dále se pohlíží na technickou spolehlivost, tedy aby byl počítač dostupný nejlépe nepřetržitě a prokázal dostatečnou bezporuchovost. Počítač však pracuje na více frontách, nejen na poli produkčních předpovědí. Počítá v danou chvíli další provozní úlohy, v tzv. asimilačním cyklu modelu zpracovává všechna přijatá měření a každou hodinu pak provede výpočet analýzy stavu podnebí. Takový počítač je ve výsledku neustále v maximálním vytížení, také proto je samozřejmě občas potřeba obměnit starý počítač za nový, modernější, který opět vylepší výkonnost, nebo například zvýší rozlišení početní mřížky. Jak již bylo řečeno výše, ČHMÚ se aktuálně může pyšnit vysoce výkonným počítačem řady SX9 od japonské IT společnosti NEC (Třípól, 2014).

5.1.3 Zdroje dat

Aladin čerpá data z mnoha zdrojů. Využívá se měření konvenčními pozemními stanicemi, které zaznamenávají parametry přízemní vrstvy vzduchu, dále radiosond pro informace o vertikálním profilu teploty, větru, tlaku a vlhkosti (stanice, které sondy vypouštějí a následně z nich získávají data, mohou být provozovány taktéž na lodích). Dalším zdrojem dat mohou být plovoucí měřicí bóje anebo čidla z komerčních dopravních letadel, která dokážou zaznamenat teplotu a proudění podél trajektorie letounu, vlhkost však nikoliv. Nejdůležitějším zdrojem jsou však pozorování pomocí satelitů. Ať už to jsou satelity geostacionární nebo s polární drahou letu, mají tyto satelity takové přístrojové vybavení, které dokáže spolehlivě naměřit vlastnosti atmosféry. A přestože satelity přímo nepozorují profily jednotlivých parametrů, integrální hodnoty na jejich výstupu je možné sofistikovanou metodou a kalibrací zpracovat do konkrétních hodnot. V neposlední řadě se užívá srážkoměrných radarů a také přístrojů, které mají za úkol naměřit větrný profil (Třípól, 2014).

5.1.4 Ověřování dat a analýza předpovědi

Ověření kvality naměřených dat je základem pro tzv. analýzu atmosféry. Měření je porovnáno s odhadem stavu atmosféry, vycházejícím z předpovědi modelu z předchozí analýzy. Případná odchylka mezi těmito dvěma hodnotami by neměla překročit stanovený práh (zvolen podle známé přesnosti měřidla a statistické chyby předběžné prognózy), jinak nastane podezření o nepřesnosti některého z přístrojů či systémů.

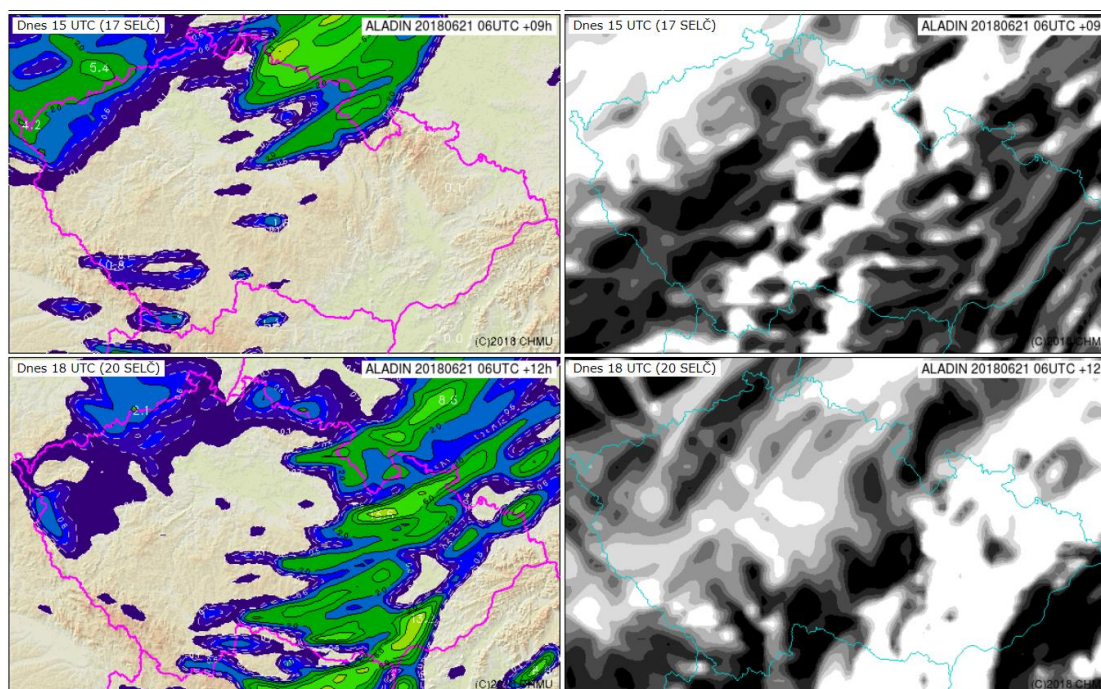
Takto zkontrolovaná měření se poté uvedou do výpočtu analýzy. Rovnice analýzy vychází z teorie optimálního odhadu, nejpoužívanějším algoritmem je tzv. variační počet. Na analýzu je potřeba dříve zmíněný „superpočítač“, jelikož jde o úlohu o velké dimenzi – model Aladin zde pracuje s konfigurací větší než 20 milionů jednotlivých bodů početní mřížky. V těchto bodech jsou analyzovány hodnoty teploty, rychlosti a směru větru, tlaku a vlhkosti. Analýza, taktéž jako předpověď, je úlohou kritickou na čas. Pro nejlepší termín počátku analýzy je důležité vyčkat na import co největšího objemu měření. U produkční předpovědi modelu Aladin je tato doba dlouhá hodinu a padesát minut.

Z již kompletní analýzy je vypočítána samotná předpověď. Po vypršení její platnosti, v čase, kdy už jsou dostupná měření, se prognóza ověří, k čemuž slouží primárně konvenční pozorování (charakteristické vysokou přesností), nebo se porovná s dostupnými analýzami. Srovnávání

předpovědí s měřením či analýzou přináší dostatečnou statistiku o funkci předpovědního modelu a slouží k jeho následnému zdokonalování (Třípól, 2014).

5.1.5 Dlouhodobé předpovědi

V meteorologii existuje skutečnost, že podle velikosti cirkulačního útvaru v atmosféře je rozdílná pravděpodobnost přesné předpovědi. Čím menší je rozlohou daný útvar, tím trvá jeho existence kratší dobu, a proto je odhad jeho lokace a času výskytu složitější. U rozsáhlých útvarů, jako jsou tlakové výše či níže, lze dosáhnout podstatné prediktability až na deset dní dopředu, samozřejmě s rezervou, bez konkrétních detailů. U takových prognóz dochází k nepřesnostem jak v měřeních, tak v modelových predikcích. Navíc prediktabilita atmosféry není konstantní veličinou, s časem se zásadně mění (Třípól, 2014).



Obrázek 3: Mapy krátkodobých předpovědí srážek (vlevo) a oblačnosti (vpravo) modelu Aladin, 21.06.2018 06:00 UTC (ČHMÚ, 2018c)

5.2 Meteoblue

Meteoblue je švýcarská soukromá předpovědní společnost se sídlem v Basileji. Přesnosti svých prognóz dosahuje díky propracovaným modelům počasí, které lze dále rozvíjet. Základ modelů pochází z MCR (Institutu pro meteorologii, klimatologii a dálkové snímání) na univerzitě v Basileji, který na vývoji spolupracoval s americkou meteorologickou službou NOAA a jejich meteorologickým modelem NEMS. Meteoblue byl založen v roce 2006, aby využil modely institutu a od té doby pokračuje ve spolupráci s MCR i NOAA.

Meteoblue měl v dubnu roku 2017 zákazníky ve 45 zemích a jeho místní webové stránky o počasí jsou přístupné téměř kdekoli na světě, dokonce i z Antarkidy, podle slov ředitele společnosti, Karla Gutbroda. Archivy Meteoblue umožňují přístup k přesným údajům o počasí za poslední tři desetiletí (BaselArea, 2017).

Modely švýcarského Meteoblue jsou založeny na technologii NMM (Nonhydrostatic Meso-Scale Modeling). Modelové výpočty se provádějí pro tzv. „domény“ – velké plochy pokrývající části nebo celé kontinenty, pro které je vypočítána celková prognóza. Domény jsou zakomponovány do globálních modelů v širším měřítku, které poskytují „hraniční“ podmínky (například proudy vzduchu, které přecházejí nebo se pohybují mimo oblast domény) pro dny předpovědi. Od roku 2013 Meteoblue počítá své vlastní globální předpovědi počasí a může tak vytvářet vlastní hraniční podmínky. Každá doména je rozdělena na buňky mřížky, které jsou uspořádány obdélníkově a jsou vzájemně rovnoměrně rozmístěné. Průměrná vzdálenost mezi středy mřížky, (body sítě) je „prostorové rozlišení“, které se pohybuje od 25 km do 1 km. Domény mají typicky 55 atmosférických úrovní, které se pohybují od povrchu až po výšku přibližně 14 kilometrů. Jednotlivé mřížkové buňky mají svou vlastní polohu, nadmořskou výšku, expozici, typ povrchu země a hraniční podmínky. Nadmořská výška je definována pomocí střední nadmořské výšky oblasti buněk mřížky, což je převzato z modelů pozemního povrchu s vysokým rozlišením (~100 m). Tento přístup umožňuje výpočet počasí zvláště pro každou oblast s jednotně vysokou kvalitou od centra města přes letiště až po vzdálené horské oblasti. Kvalita a konzistence těchto předpovědí počasí by měla být na velmi vysoké úrovni (Meteoblue, 2018c).

5.2.1 Technologie NMM

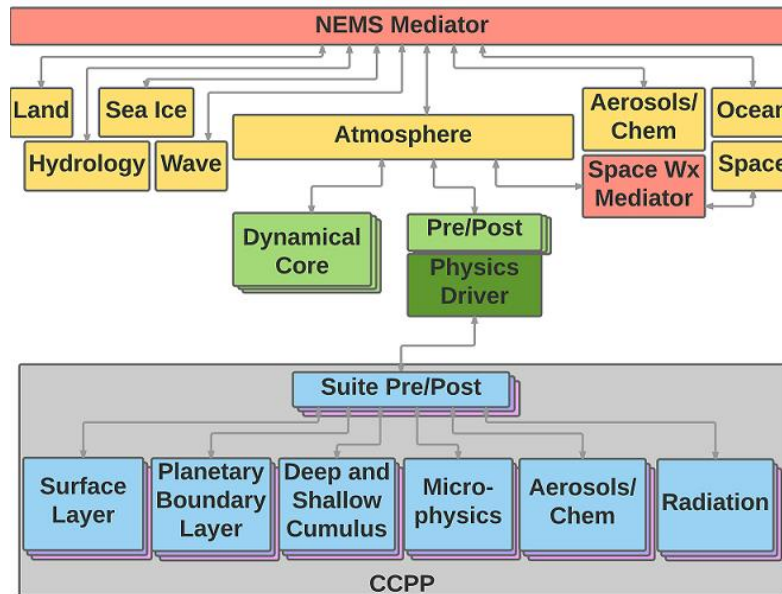
Od roku 2007 se zavedením globálního a několika kontinentálních modelů NMM se Meteoblue stal soukromým producentem s největším objemem údajů o předpovědi počasí. Taktéž je Meteoblue od roku 2008 prvním světovým poskytovatelem každodenní produkce hodinových předpovědí počasí v prostorovém rozlišení menší než 20 km pro velké části Afriky, celé Jižní Ameriky a jihovýchodní Asie. Údajně žádný jiný soukromý dodavatel v Evropě nepokrývá tolik oblastí ve stejném detailu jako Meteoblue.

Technologie NMM byla původně vyvinuta a používána pro předpovídání počasí v Severní Americe společností NOAA, a to hlavně pro předpovědi hurikánů. Novější vývoj zahrnuje rámec NEMS (Systém environmentálního modelování NOAA), který byl přizpůsoben a dále rozvíjen tak, aby umožňoval globální a regionální modelování s vysokým rozlišením se zlepšenými systémy oblačnosti a srážek (Meteoblue, 2018).

5.2.1.1 NEMS

V uplynulých několika letech byl vyvinut společný modelový rámec nazvaný NEMS. Jeho cílem je zefektivnit interakci systémů analýzy, prognóz a následného zpracování v rámci NCEP. Architektura NEMS je založena na ESMF (Modelování pozemského systému), to znamená první obecné využití ESMF v rámci NCEP. NEMS je sdílená přenosná vysoce výkonná softwarová nadstavba a infrastruktura pro použití v operačních předpovědních modelech v NCEP (NOAA, 2018c).

NEMS je jednotný komunitní systém modelování, který podporuje několik modelovacích aplikací, jako je např. GFS či NMM. Následující diagram zobrazuje hlavní součást NEMS, včetně fyzických komponent, jako jsou modely atmosféry a ledu, dílčí složky atmosféry a prostředníky mezi nimi (NOAA, 2018d).



Obrázek 4: Diagram hlavní součásti NEMS včetně fyzických komponent (NOAA, 2018d)

5.3 Yr.no

Yr.no je online meteorologická služba, kterou spolu provozují Norský meteorologický institut a Norská vysílací společnost. Tyto dvě společnosti kooperují již od roku 1923 v oblasti meteorologie, jejich předpovědi se vyznačují svou detailností a dostupnou službou pro veřejnost, která je zdarma. V norštině má zkratka yr několik významů, ovšem v tomto kontextu ji nejlépe vystihuje název „drobné mrholení“. Yr.no byl uveden v činnost v září 2007 a velmi rychle se stal oblíbeným a vyhledávaným předpovědním portálem v Norsku. Nabízí krátkodobé předpovědi v rámci hodin, i dlouhodobé předpovědi na nadcházející týden, a to vše v angličtině pro více než 9 milionů míst po celém světě. Předpovědi jsou založeny na datech poskytovaných NMI a také společnostmi ECMWF a EUMETSAT.

Yr primárně předpovídá pro Norsko, okolní severské státy a Arktický region, pro které využívá velmi přesný model o vysokém rozlišení 2,5 km, a to kvůli krátkodobým předpovědím. Ke zlepšení předpovědaných dat Yr také provádí rozsáhlé post procesní a statistické opravy výstupu modelu pro své primární oblasti. Pro střednědobé prognózy je využito modelů ECMWF, pro zbytek světa, do kterého patří i Praha, která je tématem této bakalářské práce, se konkrétně využívá model EC-HRES, model evropského centra o vysokém rozlišení (Yr, 2018a).

Tento model je nedílnou součástí principu, který používá předpovědní portál Yr.no a zároveň jedním ze samotných modelů, kterým se v této bakalářské práci věnuji. Proto model ECMWF bude dále probrán ve své vlastní kapitole.

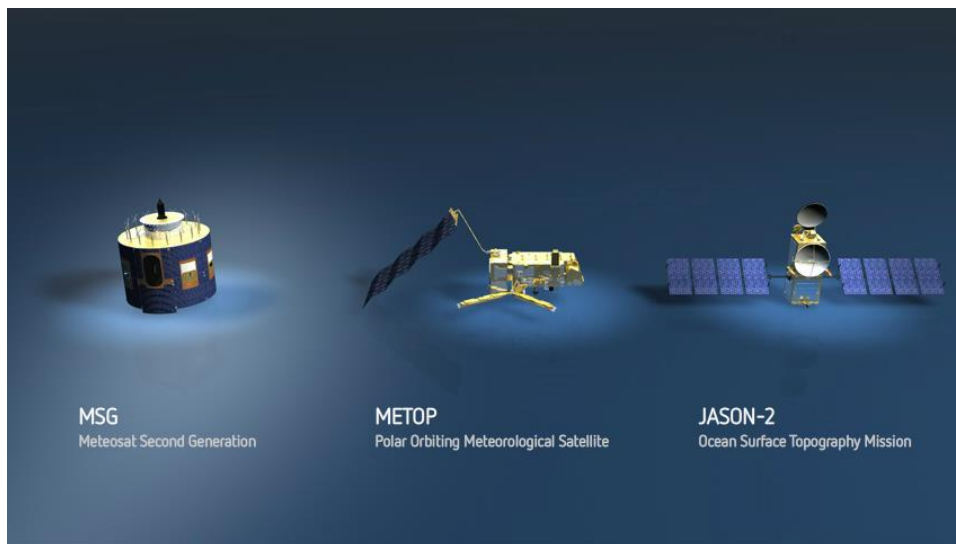
5.3.1 NMI

Norský národní institut se sídlem v Oslu byl založen roku 1866, poskytuje informace o počasí pro civilní i vojenský sektor. Vykánávající výzkumy v oborech meteorologie a klimatologie, NMI je dnes předním mezinárodní centrem odbornosti a jako organizace je státním úřadem podřízeným ministerstvu klimatu a životního prostředí. Informace o počasí a klimatu jsou dodávány různým uživatelským skupinám v širokých škálách užitečných služeb. NMI zajišťuje, aby záchranné vrtulníky vždy bezpečně dorazily a aby nouzové složky byly připraveny na extrémní počasí, z čehož plyne společný cíl všech prací NMI, a to chránit životy a majetek. Komplexní výzkum a údaje o klimatu lze využít k výpočtu budoucího klimatu Země. NMI má svobodnou a otevřenou politiku týkající se dat, což znamená, že každý může svobodně využívat veškerý dostupný materiál NMI. Pro Yr.no dodává data, která využívá každý den mnoho lidí v Norsku i zahraničí (Meteorologisk institutt, 2018).

5.3.2 EUMETSAT

EUMETSAT je společnost, která provozuje pozorování atmosféry, povrchu oceánu a povrchu země 24 hodin denně, 365 dní v roce. Tyto údaje jsou dodávány národním meteorologickým službám členských a spolupracujících států v Evropě a dalším uživatelům po celém světě. Tato služba pomáhá chránit každodenní život evropských občanů a meteorologům slouží jako identifikace vývoje potenciálně nebezpečných povětrnostních situací. Svými předpověďmi včasné varuje záchranné služby a místní úřady, a tím je docíleno zmírnění následků nepříznivého počasí a ochrany jak lidských životů, tak majetku. Tyto informace jsou také důležité pro bezpečnost letecké, lodní a silniční dopravy, jakož i pro každodenní činnosti v oblasti zemědělství, stavebnictví a mnoha dalších odvětví (EUMETSAT, 2018a).

Pro svá pozorování široké škály dat o Zemi, počasí, klimatu a životním prostředí provozuje EUMETSAT flotilu satelitů v geostacionární a polární oběžné dráze.



Obrázek 5: Meteorologické satelity aktuálně využívané společností EUMETSAT (EUMETSAT, 2018c)

5.3.2.1 Geostacionární družice

V geostacionární oběžné dráze 36 000 km nad rovníkem obíhají satelity kolem Země stejnou rychlostí, jakou se otáčí sama Země, čímž systematicky pozorují stejnou část Země pod stejnou geometrií, čemuž se říká tzv. zemský disk. To umožňuje pořizovat snímky zemského disku s velmi vysokou frekvencí v řádu několika minut. EUMETSAT k těmto účelům používá geostacionární družici MSG.

5.3.2.2 Polární družice

V dolní polární oběžné dráze létají satelity Metop v nadmořské výšce 817 km a poskytují podrobnější pozorování globální atmosféry, oceánů a kontinentů. Metop-A, první evropská meteorologická družice s polární oběžnou dráhou, dodává provozní data od roku 2007, provoz druhé družice Metop-B byl zahájen roku 2012, přičemž od roku 2013 je družicí primární. Metop-A bude nadále provozována tak dlouho, dokud budou její dostupné kapacity přinášet uživatelům výhody. Ilustrace satelitu Metop byla dříve znázorněna v kapitole 4.2.2 (EUMETSAT, 2018b).

5.3.2.3 Pozemní segment

Pozemní segment představuje pozemní infrastrukturu nezbytnou k podpoře provozu družic včetně řízení kosmických lodí na oběžné dráze a získávání, příjem, zpracování a doručení jejich dat. Centrum pro kontrolu misí EUMETSAT (MCC) sídlí v Darmstadtu v Německu a odpovídá za bezpečné fungování všech družic. Skládá se ze dvou hlavních kontrolních místností, z nichž jedna je určena pro geostacionární mise a druhá pro nízké orbitální mise. Poskytuje potřebné monitorování a kontrolu všech provozních družic a přidružené pozemní infrastruktury, zajišťuje trvalou komunikaci se satelity.

Soubor dat a produktů generovaných v pozemním segmentu je poté dodáván uživatelům v reálném čase nebo off-line. Ve výsledku tato družicová pozorování a data z nich také podporují potřeby aplikací pro NWP – numerické předpovídání počasí (EUMETSAT, 2012).

5.4 ECMWF

ECMWF neboli Evropské centrum pro střednědobé předpovědi počasí, začalo poskytovat provozní předpovědi počasí v roce 1979. Tyto prvotní předpovědi byly nabízeny bez odhadu nejistoty, na čemž se začalo pracovat ve výzkumech už od roku 1980. Po více než deseti letech se Evropskému centru podařilo vyvinout funkční „techniku předpovídání počasí typu ensemble“ s určením nejistoty, jejíž první předpovědi spatřily světlo světa roku 1992. Tato metoda bude probrána o několik odstavců níže (ECMWF, 2018a).

Tento způsob předpovídání si později vysvětlíme, a to i na konkrétním provedení EC-HRES, který je taktéž využíván dříve zmíněným yr.no.

Společnost ECMWF produkuje hlavně střednědobé, ale i měsíční a sezónní předpovědi, a to až rok dopředu. Jsou poskytovány aktuální prognózy, analýzy klimatu a specifické datové sady. Jsou k dispozici členským a spolupracujícím státům, jakož i Světové meteorologické organizaci (WMO), akademickému a obchodnímu sektoru. (ECMWF, 2018b).

K veškerým předpovědím používá ECMWF číselný model. Základem bylo vytvořit si svůj vlastní atmosférický model a systém asimilace dat, v součtu tzv. Integrovaný předpovědní systém (IFS). Komplexní model systému Země vyvinutý v ECMWF ve spolupráci s Météo-France zde tvoří základ pro všechny asimilační a prognostické činnosti. Všechny hlavní potřebné aplikace jsou k dispozici prostřednictvím jednoho počítačového softwarového systému, výše zmíněného IFS.

Aby bylo možné vytvořit předpověď počasí, je potřeba nejprve namodelovat dynamiku atmosféry a fyzikálních procesů, jako je tvorba oblačnosti, atmosférické složení a další procesy v systému Země, které mají vliv na počasí. ECMWF říká, že každá prognóza, kterou vyprodukuje, je omezena skutečností, že atmosféra je chaotická (nelze nikdy úplně znát přesný počáteční stav atmosféry) a jeho numerické modely nemohou dokonale představovat zákony fyziky, které řídí dynamické rovnice. Musí se také zjednodušit modely mnoha procesů, které se vyskytují ve velmi malých měřítkách, jako je tvorba místní oblačnosti. To znamená, že všechny prognózy budou svázány určitou nejistotou. ECMWF je průkopníkem metod kvantifikování prognózy nejistoty a poskytnutí pravděpodobnostní prognózy.

Proč pravděpodobnostní předpovídání? Tradiční numerická prognóza počasí se postupně rozvíjela zlepšením jednotlivých „deterministických“ prognóz se zvyšující se přesností modelu a snižováním původních chyb. Meteorologická atmosféra, jak již bylo zmíněno dříve, je však chaotický systém v časovém rozmezí několika dnů až týdnů, v závislosti na prostorových měřítkách zájmu. Prognóza výslovně obsazená pravděpodobnostními podmínkami je lepší nejen proto, že poskytuje uživateli odhad chyby, ale i proto, že je více „pravdivá“. Pravděpodobnostní prognóza jinými slovy přináší zprávu, která doslova připomíná uživateli, že vždy existuje nejistota, která by měla být zvážena a zohledněna při praktickém použití předpovědi (ECMWF, 2018e).

5.4.1 Předpovídání typu „ensemble“

Lze volně přeložit také jako souborové předpovídání, rozhodl jsem se však zanechat i původní, anglický název. Jedná se o sadu předpovědí, která představuje rozsah budoucích možností vývoje počasí. Spouští se několik simulací, z nichž každá má nepatrné změny původních podmínek a mírně narušené modely počasí. Tyto variace představují nevyhnutelnou nejistotu v počátečních podmínkách a aproximacích modelů. (ECMWF, 2018a).

Tímto způsobem jsou vytvářeny řady možných povětrnostních podmínek místo toho, aby byla vytvořena pouze jedna, která by s velkou pravděpodobností vedla k nepřesné predikci. Díky předpovídání typu „ensemble“ organizace ECMWF byly již v minulosti správně a včas předpovězeny ničivé účinky přírody. Například na úder hurikánu Sandy na východním pobřeží Spojených států amerických ECMWF upozornilo s dvoudenním předstihem před samotnou americkou předpovědní službou, čímž bylo docíleno včasných příprav obyvatel a pravděpodobně i následné efektivnější ochrany majetku či dokonce životů (ECMWF, 2017).

Neurčitost spojená s každou prognózou znamená, že existují všelijaké rozmanité scénáře, které mohou nastat, což by mělo být odrazem prognózy. Jednotlivé „deterministické“ prognózy mohou být zavádějící, protože tuto informaci o neurčitosti neposkytují. Vezměme si příklad ze zemědělství, kdy zemědělec potřebuje znát rozsah možných podmínek, které jsou potřeba, aby byla úroda bohatá. Předpovědi typu „ensemble“ ukazují právě tento rozsah a jeho velikosti v různých předpovědních časech. Tím, že je generována skupina možných výsledků, metoda dokáže ukázat, jak jsou pravděpodobné různé scénáře v následujících dnech a jak dlouho do budoucnosti budou prognózy užitečné. Čím menší vyjde rozsah očekávaných výsledků, tím konkrétnější prognóza bude. Konkrétnost je ale zbytečná, pokud není doplněna o spolehlivost, která je důležitějším parametrem. Pokud například spolehlivá předpověď říká, že existuje 70 % pravděpodobnost, že nejvyšší teploty stoupnou nad určitou prahovou hodnotu, potom v 70 % případů, kdy bude taková předpověď provedena, se teplota skutečně zvýší nad tento práh.

Nejistota v prognóze je způsobena nedostatkem znalostí, proto společnost ECMWF stále pracuje na rozvoji znalostí o počátečních podmínkách a atmosférických procesech, které je žádoucí počítačem vymodelovat. Kromě toho je atmosféra chaotickým systémem, což znamená, že je citlivě závislá na počátečních podmínkách. V chaotickém systému je totiž mírná odchylka vstupních podmínek důvodem k významné změně ve výstupní prognóze. Naopak v systému, který je nechaotický, malé rozdíly v počátečních podmínkách znamenají pouze malé změny ve výstupu. Proto je při plánování předpovědi počasí nutné zkoumat, jak citlivá je atmosféra v jakékoli fázi v počátečních podmínkách. Souborové předpovídání tohoto stylu dosahuje ziskem rozsahu možných výsledků.

Primárním cílem organizace je nadále udržovat a vylepšovat předpovídání typu „ensemble“, což ECMWF zmiňuje ve své strategii na dalších deset let, publikovanou v roce 2016 pod názvem „Síla společného cíle“ (ECMWF, 2018a).

5.4.2 EC-HRES

Model tohoto typu o vysokém rozlišení využívá již dříve zmíněného souboru (ENS) a členu o vysokém rozlišení (HRES). Tyto dvě části spolu úzce souvisí a tvoří nerozdělitelný pár. HRES a ENS pocházejí ze stejného předpovědního systému IFS a měly by být používány, kdykoli to bude možné, společně k zajištění toho nejdetailnějšího popisu budoucího počasí a s ním souvisejících nejistot. Předpovědní produkty na internetu jsou samozřejmě vyvíjeny a zobrazovány společně k dosažení výše zmíněné přesnosti (ECMWF, 2012).

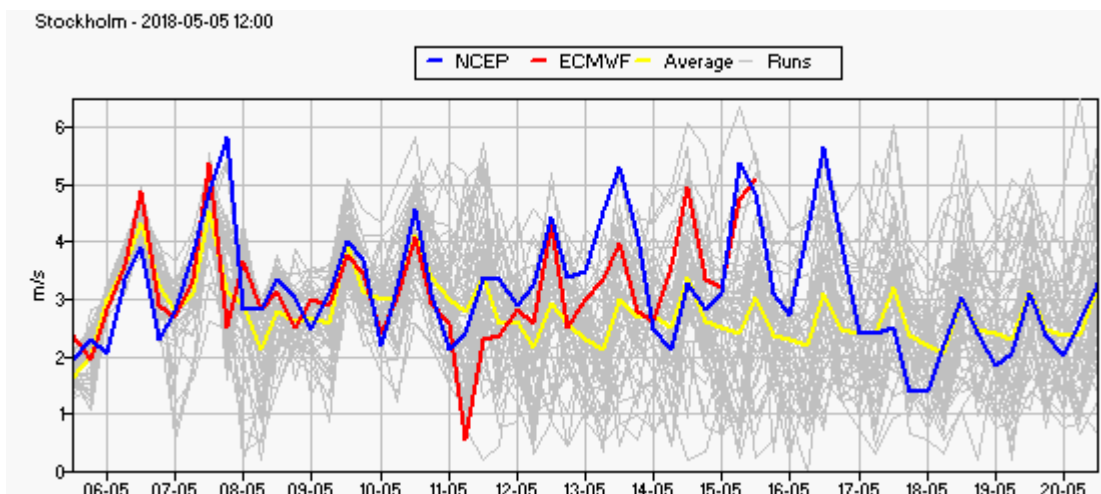
ENS se skládá z 51 separátních předpovědí vytvořených jedním počítačem. Všechny předpovědi jsou aktivovány najednou, v totožný čas, počáteční podmínky pro každou z těchto předpovědí ze souboru jsou trochu odlišné, stejně tak jako vstupní hodnoty fyzikálních parametrů. Rozdíly mezi těmito členy souboru mají tendenci růst, jak se prognóza vyvíjí (ECMWF, 2018c).

Tento soubor předpovědí je vytvářen dvakrát denně, přičemž jeden člen má trochu výjimečné vlastnosti, má totiž vyšší prostorové rozlišení, tento člen nese u modelu ECMWF název HRES. Jeho počátečním stavem je ten nejpřesnější možný odhad současných podmínek, k čemuž využívá momentálně nejlepšího popisu modelové fyziky. HRES poskytuje vysoce detailní popis budoucího počasí a je zprůměrován v mnoha předpovědích. Jedná se o nejpřesnější prognózu na určité období, která se určuje v současné době na deset dní a zahrnuje mnoho prvků atmosféry (teplota, tlak, vítr aj.). Avšak pro jednu konkrétní předpověď nemusí být tento člen o vyšším rozlišení nejdůležitějším prvkem souboru, v takovém případě při izolovaném pohledu na tuto předpověď nelze určit nejistotu či spolehlivost prognózy.

Další speciální člen, který je jedním ze souboru o padesáti dvou prvcích, je tzv. kontrolní predikce, CNTL. Má nižší prostorové rozlišení než HRES, ale při tomto nižším rozlišení používá také nejpřesnější možný odhad současných podmínek a nejlepší popis modelové fyziky. Významem této predikce je poskytování nerušeného členu, na kterém jsou aplikovány odchylky ostatních členů souboru.

Zbylých padesát rozptýlených členů má podobné vlastnosti jako CNTL, ale jejich počáteční stavy a modelová fyzika byly narušeny, aby prozkoumaly současně pochopený rozsah nejistoty pozorování a modelu. Tyto rozrušené členy poskytují řadu možných budoucích povětrnostních stavů. Když se zprůměruje dostatečný počet předpovědí (ne nutně pro nějakou konkrétní prognózu), mají nižší přesnost než HRES nebo CNTL. I tak však poskytují odhad předpokládané nejistoty nebo spolehlivosti. Kromě HRES pokračují zbylé členy včetně CNTL po patnácti dnech při sníženém horizontálním rozlišení (ECMWF, 2018d).

Následující graf ze dne 05.05.2018 ukazuje za použití barevných křivek souborové předpovědi společností ECMWF a NCEP (model GFS). Znárodně je vývoj větru v metrech za sekundu na patnáct dní dopředu pro oblast Stockholmu.



Obrázek 6: Předpověď větru typu „ensemble“ pro Stockholm, 05.05.2018 12:00 UTC (WeatherCast, 2018)

Padesát rozptýlených členů s rozdílnými počátečními podmínkami je ve výše uvedeném grafu zobrazeno jako šedé čáry, jejich průměr je barvy žluté. Pokud jsou jednotlivé šedé křivky blízko u sebe, počasí je stabilní a důvěryhodnost výsledku je vysoká. V opačném případě, kdy se jednotlivé soubory rozkládají v širším rozmezí, je důvěryhodnost nižší, což je obvyklé pro předpovědi delší než týden – lze odpozorovat z grafu, v posledních dnech predikce je spolehlivost podstatně menší než pro první dny.

Graf zobrazuje předpovědní křivky jak pro model ECMWF (zobrazen červeně), tak pro americký model GFS společnosti NCEP (zobrazen modře). Čím více se tyto křivky blíží k souboru, tedy ke křivkám šedým, tím má opět model větší jistotu správné předpovědi (WeatherCast, 2018).

5.5 GFS

Global Forecast System, česky Globální předpovědní systém, je globální numerický počítačový model předpovědi počasí vytvořený národními středisky pro environmentální předpovědi (NCEP), provozovaný americkým úřadem NOAA. GFS byl dříve znám jako model GFS Aviation (AVN) a model GFS Medium Range Forecast (MRF), a to až do 1. ledna 2003 (NOAA, 2018b).

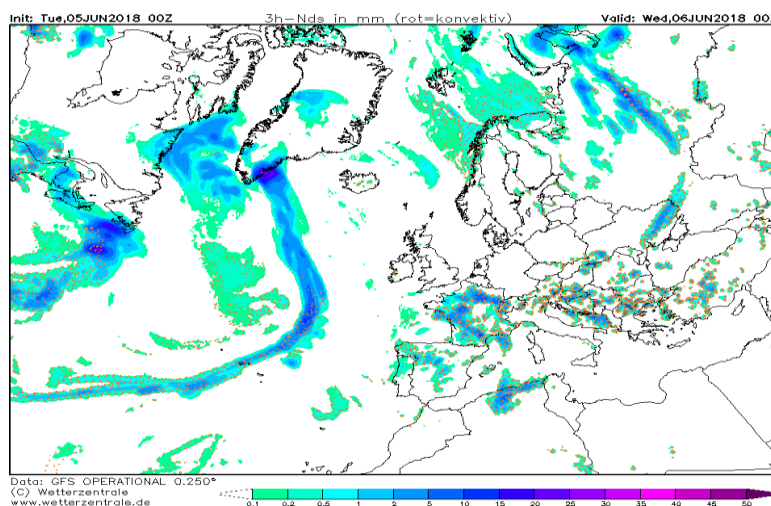
Tento matematický model funguje na podobné bázi jako ECMWF, tedy předpověď typu „ensemble“. Je však spouštěn čtyřikrát denně a vytváří předpovědi až na 16 dní dopředu, i když s klesajícím prostorovým a časovým rozlišením v průběhu času je všeobecně známo, že po sedmi

dnech je prognóza velmi obecná a není příliš přesná. To je nicméně názorně prokázáno na *Obrázku 6* v kapitole 5.4.2, ve které je popsán princip předpovědí typu „ensemble“. Na obrázku je znázorněn graf zobrazující souborové předpovědi větru obou modelů – ECMWF i GFS.

GFS Model je rozdělen na dvě části: první část má vyšší rozlišení a v té předpověď vyprší během 180 hodin (7 dní), druhá část běží od 180 do 384 hodin (16 dní) při nižším rozlišení. Rozlišení modelu se mění v každé části modelu: vodorovně rozděluje povrch země na čtverce, které spolu tvoří jednu velkou mřížku; vertikálně rozděluje atmosféru do 64 vrstev a vytváří předpověď každou třetí hodinu pro první část modelu a poté každou dvanáctou hodinu v části druhé (WeatherOnline, 2018).

V množině dat, kterou poskytuje GFS, jsou k dispozici desítky atmosférických a půdních proměnných, od teplot, větrů a srážek až po půdní vlhkost a atmosférickou koncentraci ozonu. Model GFS pokrývá celou planetu při základním horizontálním rozlišení 28 kilometrů mezi body sítě. Této přesnosti s využitím modelu dosahují předpovědi maximálně 16 dnů dopředu. Většinou však horizontální rozlišení klesá až na 70 kilometrů mezi body v mřížkové síti.

Model GFS je výsledkem spojení čtyř samostatných modelů (model atmosféry, oceánský model, model půdy a model mořského ledu), které společně poskytují přesný obraz o počasí. Jelikož je GFS neustále se vyvíjející a zlepšující se model počasí, jsou prováděny pravidelné změny a úpravy, které vedou ke zlepšení výkonnosti a přesnosti prognóz. Údaje v podobě mřížkované sítě jsou k dispozici ke stažení prostřednictvím NOMADS úřadu NOAA (NOAA, 2018b).



Obrázek 7: 24hodinová předpověď srážek nad Evropou podle modelu GFS, 05.06.2018 00:00 UTC (Wetterzentrale, 2018)

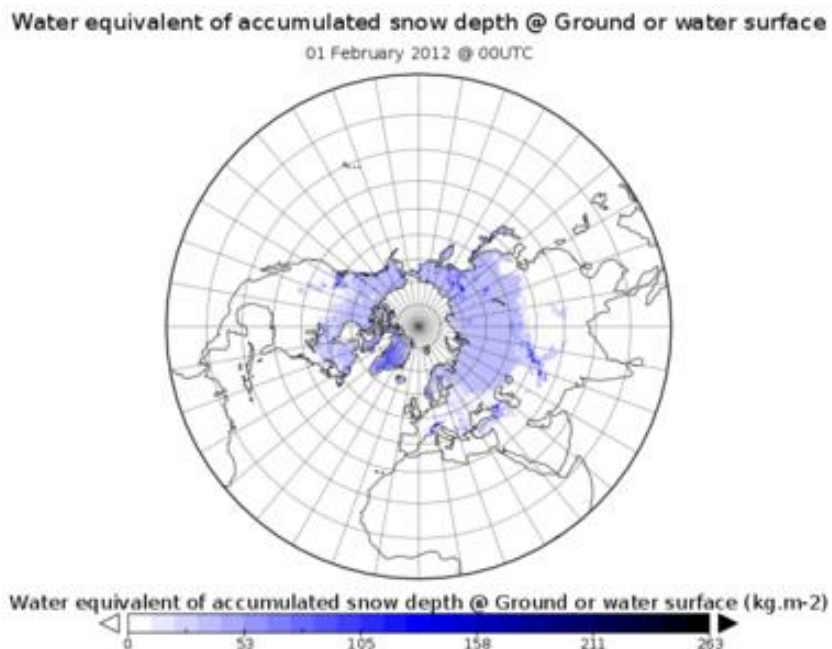
5.5.1 Model atmosférické předpovědi

Modelem atmosférické předpovědi používaným v GFS je globální spektrální model (GSM) se sférickými harmonickými základními funkcemi. V reakci na zlepšení výpočetních zdrojů a na změnu architektury počítačů v NCEP došlo k vyvinutí vyššího rozlišení předpovědí, a to jak horizontálně, tak vertikálně. Aktuální operační horizontální rozlišení je až 13 km na rovníku pro předpovědi do deseti dnů a snižuje se na 34 km pro prognózy do šestnácti dní. Současné operační jádro GFS/GSM stojí na velmi složitém matematicko-fyzikálním základě, který přesahuje rozsah této bakalářské práce. Stejný balíček fyzické parametrizace se používá u všech horizontálních i vertikálních rozlišení, pouze s mírně odlišně laděnými parametry. K aktualizacím fyzických parametrizací dochází v průměru každý druhý rok (NOAA, 2018a).

5.5.2 Globální systém pro asimilaci dat (GDAS)

Výchozí podmínky pro globální prognózy modelu GFS jsou získány prostřednictvím systému GDAS. GDAS k získání dat přijímá veškeré dostupné globální satelitní, konvenční (letadlové, povrchové, pomocí sond a bóji) a radarové pozorování s plus/minus tříhodinovou periodou analýzy. Tato odpozorovaná data jsou poté využita pro vytvoření trojrozměrného mřížkového modelového prostoru a k zahájení předpovědi počasí modelu GFS. Pro prvotní odhad asimilace je použita devítihodinová předpověď GSM z předchozí analýzy GDAS. Údaje GDAS jsou k dispozici prostřednictvím NOMADS společnosti NOAA, a to v podobě jak vstupního pozorování, tak mřížkového výstupního pole (NOAA, 2018a).

Nedávným, leč významným přírůstkem do GDAS je například provedení variační korekce zkreslení pro data o teplotě letadla, což způsobí přesnější záznam okolní teploty ve vyšších vrstvách troposféry. Dnes je navíc GDAS schopen asimilovat data z AMSU-A mikrovlnného záření, které poskytuje informace o vodě v atmosféře ve všech jejích formách (s výjimkou malých ledových částic, které jsou při mikrovlnných frekvencích transparentní), takže i v podmínkách oblačnosti (NOAA, 2016).



Obrázek 8: Výstup systému GDAS znázorňující množství vody ve sněhu pokrývající zemi, 01.02.2012 00:00 UTC (NOAA, 2018a)

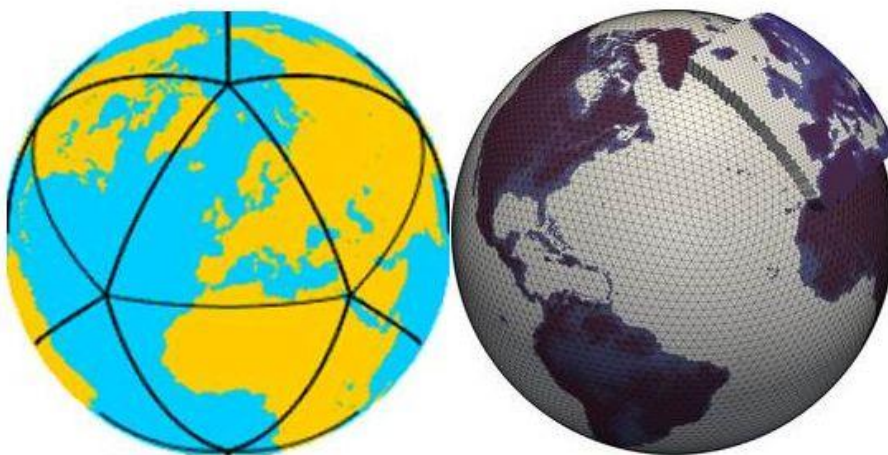
5.6 ICON

Jako jeden z několika globálních numerických predikčních modelů zahrnuje do svých předpovědí data z prakticky celé Země. Většina meteorologických služeb však spíše pracuje na svých vlastních prognostických modelech, které se omezují na určitou plochu o dané rozloze a díky tomu se dokážou soustředit na svou konkrétní oblast zájmu. Tyto modely jsou závislé na hraničních podmínkách poskytovaných globálními modely v celé jejich prognóze.

Předchůdce společnosti ICON byla společnost s názvem GME, která začala se svým provozem roku 1999. GME byl prvním operačním modelem NWP na světě, který využíval mřížek tzv. dvacetistěnu (angl. icosahedron), přičemž tato struktura mřížky byla zachována pro ICON. Ve srovnání s tradičními přístupy, jako je například síť zeměpisné délky a šířky, mřížky dvacetistěnu poskytují téměř homogenní pokrytí celé zeměkoule. Tím se zabrání oblasti problémů související s konvergencí poledníků v sítích zeměpisné délky a šířky, která představuje vážné nepříjemnosti pro efektivní implementaci výpočtů (Deutscher Wetterdienst, 2018).

5.6.1 Parametry modelového dvacetistěnu

Generace mřížky začíná u dvacetistěnu, který je vepsán do koule. Spojením dvanácti vrcholů dvacetistěnu s geodetickými čarami vzniká 20 rovnostranných sférických trojúhelníků s délkou okraje přibližně 7054 km. Iterativní dělení (např. bisekce, trisekce) okrajů trojúhelníku pak poskytuje modelovou mřížku s požadovaným prostorovým rozlišením. Účinná velikost sítě modelové mřížky je definována jako „druhá odmocnina střední oblasti sférických trojúhelníků“. V současné operační verzi má globální mřížka ICON 2 949 120 trojúhelníků, což odpovídá průměrné ploše 173 km², a tedy efektivní velikosti ok mřížky asi 13 km. Všechny modelové proměnné (teplota, vítr, vlhkost, hustota, oblačnost, déšť a sníh) jsou průměrovány do těchto oblastí buněk o výše zmíněné rozloze 173 km². To platí i pro externí parametry, jako je orografie (Deutscher Wetterdienst, 2018).



Obrázek 9: Schematické zobrazení struktury mřížky dvacetistěnu (vlevo) a příklad mřížky s vylepšenou oblastí v Evropě (vpravo) (Deutscher Wetterdienst, 2018).

5.6.2 Sledované veličiny a jevy

Nejdůležitějšími prognostickými proměnnými ICON jsou hustota vzduchu, virtuální potenciální teplota (která umožňuje diagnostikovat tlak), horizontální a vertikální rychlost větru, vlhkost, voda a led v oblačnosti, déšť a sníh. Tyto proměnné jsou vypočteny pro všechny buňky sítě na 90

terénních modelových úrovních, které se rozkládají od povrchu do výšky 75 km, což představuje celkem 265 milionů bodů sítě. Na zemském povrchu jsou řešeny další prognostické rovnice pro teplotu půdy a obsah půdní vody do hloubky o sedmi úrovních. Je-li přítomna sněhová pokrývka, navíc se předpokládá ekvivalent sněhové vody a hustota sněhu. Teplota povrchu moře nad povrchy oceánů bez ledu je analyzována jednou denně z pozorování a během prognózy ICON je udržována konstantní. U ledových částí oceánů se frakce mořského ledu analyzuje taktéž jednou denně z pozorování, zatímco tloušťka ledu a teplota povrchu ledu jsou předpovězeny jednoduchým modelem mořského ledu.

Pro NWP vedle horizontálních a vertikálních transportních procesů (tzv. adiabatických procesů) v atmosféře hrají významnou roli tzv. diabatické procesy, jako je záření, turbulence, tvorba oblačnosti a srážky. Popis těchto procesů, které probíhají v prostoru o mnohem menším horizontálním měřítku, než je velikost modelového oka mřížky, je úkolem fyzikálních parametrizací (Deutscher Wetterdienst, 2018).

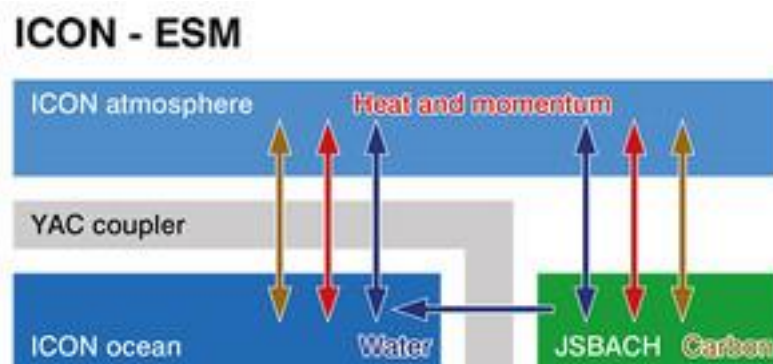
5.6.3 Využití předpovědí

V rámci operačního toku ICON je třeba rozlišovat mezi cyklem asimilace dat a režimem předpovědi. Cílem cyklu asimilace dat je stanovit optimální počáteční podmínku pro předpovědi. Za tímto účelem je vytvořena tříhodinová předpověď počínaje předchozí analýzou (tzv. první odhad), ta je kombinována se všemi pozorováními platnými pro tříhodinové časové okno se středem data analýzy s využitím trojrozměrné variantní metody asimilace. Prognózy se provádějí čtyřikrát za den s trvanlivostí 180 hodin pro předpovědi začínající v 00:00 a 12:00 UTC, 120 hodin pro předpovědi se začátkem v 06:00 a 18:00 UTC. V současné konfiguraci německé předpovědní služby DWD, která je jedním z provozovatelů modelu ICON, potřebuje ICON zhruba 8 minut času v jednom předpovědním dni na superpočítači DWD. Během této doby vyprodukuje počítač zhruba 900 GB dat na sedmidenní předpověď.

Kromě využití národními meteorologickými službami má ICON mnoho dalších externích uživatelů, kteří předpovědi využívají jako základ pro své produkty. Pro příklad regionální hydrologické úřady používají srážkové pole pro předpovídání povodní, Federální námořní a hydrografická agentura využívá větrných polí pro předpovědi nárazových bouří. Navíc více než 30 národních meteorologických služeb z celého světa používá prognózy ICON k získání postranních hraničních podmínek pro své předpovědi v dané omezené oblasti (Deutscher Wetterdienst, 2018).

5.6.4 ICON-ESM

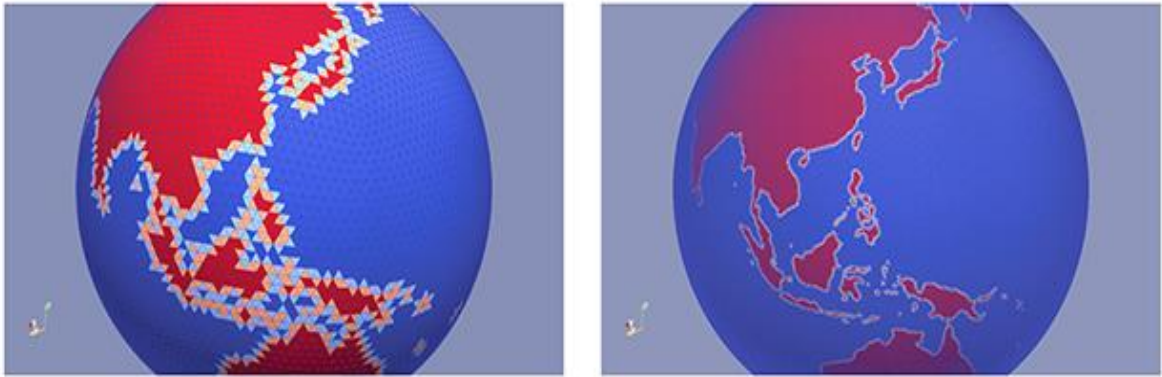
System ICON Earth System (ICON-ESM) je specifickou aplikací modelu ICON. Popisuje atmosféru, oceán a zemi pomocí následujících modelů: ICON-A pro atmosféru, ICON-O pro oceán a ICON-L pro zemi. Tyto komponenty jsou spojeny s proudy energie, hybnosti, vody a oxidu uhličitého na povrchu Země. Atmosféra a pozemní komponenty jsou sjednoceny na stejné vodorovné mřížce a používají stejný časový krok. Oceánská složka, včetně biogeochemie oceánu, však používá mřížku o vyšším rozlišení, tudíž její spojení s atmosférou vyžaduje spojovací postup pro interpolaci a agregaci mezi různými sítěmi. K tomu používá ICON-ESM propojku YAC, viz následující obrázek (Max-Planck-Institut für Meteorologie, 2018a).



Obrázek 10: Schéma propojení komponentů v systému ICON-ESM (Max-Planck-Institut für Meteorologie, 2018a)

5.6.4.1 Spojené simulace ICON-ESM

Simulace ICON-ESM probíhají při rozlišení 160 km pro atmosféru (ICON-A) a zemi (ICON-L) se 47 atmosférickými vrstvami až do výšky 80 km a s rozlišením 40 km a 64 vertikálními vrstvami pro oceán (ICON-O) (Max-Planck-Institut für Meteorologie, 2018b).



Obrázek 11: Typická konfigurace mřížky ICON-A (vlevo) a ICON-O (vpravo), které jsou spojeny do výstupu ICON-ESM (Max-Planck-Institut für Meteorologie, 2018b)

6 Záznam meteorologických předpovědí – pozorované prvky

Mé vlastní zaznamenávání meteorologických předpovědí a následných skutečně nastalých povětrnostních podmínek jsem prováděl pro oblast Letiště Václava Havla v Ruzyni. Jedná se o 24hodinové prognózy základních atmosférických veličin – teploty, pokrytí oblačnosti, úhrnu srážek, rychlosti větru a jeho směru, relativní vlhkosti vzduchu, atmosférického tlaku a rosného bodu, vše bráno v přízemní výšce, přičemž některým z modelů chyběla jedna nebo dvě z těchto sledovaných hodnot. Modely, kterým předpovědi pro konkrétní veličinu chyběly, nebyly ve zpracovávání přesnosti této veličiny zahrnuty. K záznamu jsem použil chytrý telefon a pomocí veřejně dostupných online aplikací a webových stránek podporujících jednotlivé modely jsem v určitou hodinu zaznamenal na telefonu pomocí funkce „zachycení obrazovky“ předpovědi na tutéž hodinu pro následující den. Předpovědní časy jsem zvolil 06:00, 09:00, 12:00, 15:00, 18:00 a 21:00 místního času, na které, pokud modely neměly rozlišení po jedné hodině, byly téměř všechny předpovědi orientovány. Pouze Meteoblue své předpovědi uváděl s hodinovým rozdílem od ostatních, o čemž se dále zmíním v kapitole 7.2. Z výše zmíněných časů jsem během dne vždy jeden náhodně vybral, v tento čas jsem postupně pečlivě zaznamenal veškeré předpovědi všech předpovědních zdrojů. Nashromáždít jednotlivé předpovědi všech pozorovaných modelů trvalo dohromady vždy přibližně 3-5 minut a bylo potřeba zachytit 21 obrázků předpovědí a po 24 hodinách ještě jeden obrázek z meteorologické zprávy o aktuálním počasí, vydávanou ČHMÚ pro každou hodinu. Nastřádaná data jsem následně vpisoval do listu „Měření“ v programu MS

Excel, kde jsem vytvořil elektronickou tabulku, která v prvním sloupci obsahuje názvy modelů a vždy přesný čas, na kterou jsou prognózy vydány. V prvním řádku figurují sledované veličiny, poslední řádek každého dne je uzavřen přesnými hodnotami nastalých skutečností podle ČHMÚ. Kromě šesti modelů, o kterých jsem se rozepsal v teoretické části, jsem do pozorování také zahrnul další mobilní aplikaci jménem Klara, která využívá předpovědi čistě z NMI, o kterém jsem se zmiňoval v kapitole 5.3. I když se nejedná přímo o model předpovědi, rozhodl jsem se tuto aplikaci

do experimentu zahrnout, jelikož ji sám dlouhodobě využívám, poskytuje jako jedna z mála úplně všechny pozorované meteorologické prvky a osobně mne zajímalo, jak v přesnosti obstojí oproti modelové konkurenci. Plnohodnotných předpovědí jsem nastřádal celkem 90, vždy maximálně jednu denně, v rozmezí dat od 09.03.2018 do 04.08.2018.

6.1 Teplota

Teplota byla pro měření nejjednodušším parametrem, který v mých pozorováních figuroval. Všechny sedm předpovědních portálů mělo jednoznačně publikovanou číselnou hodnotu předpovídané teploty ve stupních Celsia ($^{\circ}C$), buď zaokrouhlenou na celé číslo, nebo na jedno desetinné místo. Pouze u Yr.no jsem pro záznam předpovědi odečítal hodnoty z grafu, i když tento model nabízel i číselné hodnoty. Tuto možnost jsem před dalšími dvěma upřednostnil mimo jiné proto, že v podobě grafu poskytovalo Yr.no více veličin s konkrétnějšími hodnotami, nezaokrouhlenými na celá čísla, což jsem určil za nejpřesnější metodu (více v kapitole 7.3).

6.2 Pokrytí oblačnosti

K pozorování oblačnosti jsem zvolil k hodnocení pokrytí model užívaný primárně v letectví, a to rozdělení pokrytí oblačnosti do osmin. Tedy jasno představuje hodnotu 0/8, zatímco úplně zataženo je označeno jako 8/8 atd. Většina modelů udávala pokrytí oblačnosti buď v procentech nebo jen jako karikaturu „sluníčko/obláček.“ V případě procent jsem jednoduše převedl procenta na osminy – 100 % rozděleno na devět částí, 0-8 osmin. Každých 11,1 % znamenalo jedna osmina více, tedy 11 % oblačnosti bylo bráno ještě jako jasno a 89 % už bylo zaznamenáno jako úplně zataženo. Na druhou stranu, pokud předpověď oblačnosti byla řešena pouze symbolicky, tedy ikona slunce a obláčku, přistupoval jsem k pokrytí oblačnosti subjektivně, podle toho, jak velký byl poměr těchto dvou prvků.

6.3 Úhrn srážek

Sledovat předpovědi srážek bylo nejzajímavější částí mého pozorování, i když v rozsahu mých měření došlo k dešti velmi neobvykle. Když už tedy došlo na průtrž mračen nebo na slabé mrholení, předpovědi se velice lišily, nejvíce ze všech veličin. Jak už bylo zmíněno dříve, dodnes je prognostika lokálních dešťů stále náročnou disciplínou, v mém výzkumu šlo konkrétně pouze o letiště Václava Havla v Ruzyni, což je velice úzká oblast a ve výsledcích je zřejmé, že s takovou přesností, aby byl odhadnut přesný úhrn srážek, zatím nepředpovídá snad žádný model. Většinou se příchod dešťů podle meteorologického radaru ČHMÚ buď zpozdil nebo naopak přešel dříve, proto byly předpovídané hodnoty málokdy přesné. Ovšem takto kriticky lze mluvit pouze o přesnosti srážkového množství, který není pro civilního ani leteckého uživatele příliš důležitou hodnotou. Když už byly deště předpovězeny, v mnoha případech také nastaly, což je pro jakéhokoliv uživatele nejdůležitějším parametrem. U všech testovaných předpovědních portálů byla uváděna vždy symbolika pravděpodobného deště, ať už ikonou kondenzujícího obláčku nebo kapiček, k čemuž byla vždy připojena hodnota přesného odhadovaného úhrnu v milimetrech za hodinu (mm/h). Ve dvou případech (12.06.2018 a 12.07.2018) nastala bouřková aktivita v okolí pozorovací stanice a posléze bylo v meteorologické zprávě o aktuálním počasí za poslední hodinu publikováno „Úhrn srážek za poslední hodinu – neměřitelné“. V takové situaci jsem nemohl brát předpovídané hodnoty v úvahu, a proto se ve statistice projeví všechny předpovědi jako bezchybné, čili s nepřesností 0 mm .

6.4 Rychlost větru

Rychlost větru patří mezi základní sledované veličiny, zejména letecký uživatel ocení její předběžnou znalost, kterou doplňuje směr větru. Pilota zajímá rychlost větru hlavně kvůli očekávanému snosu na trati, nebo kupříkladu kvůli limitům bočního větru na vzlet/přistání konkrétního letadla. Aby bylo možné uváděné hodnoty rychlosti větru ve výsledku porovnat, převáděl jsem vždy rychlosti na metry za sekundu (m/s), kterou využívala většina modelů. Kromě m/s se využívalo pro určení rychlosti větru také uzlů (kt) a kilometrů za hodinu (km/h). Převod na m/s jsem zvolil zjednodušeně takto:

- $m/s = \frac{kt}{2}$
- $m/s = \frac{km/h}{3,6}$

6.5 Směr větru

Kritický údaj pro leteckého uživatele, na směr větru závisí volba dráhy na vzlet a přistání, ale také volba konfigurace letadla, volba trati aj. Směr větru je veličinou, kterou jsem se rozhodl „zaokrouhlit“ na osm světových stran – severní (S), jižní (J), východní (V), západní (Z), severovýchodní (SV), jihovýchodní (JV), severozápadní (SZ) a jihozápadní (JZ). Žádný z předpovídajících nekonkretizuje směr větru na stupně, čemuž lze naprosto rozumět. Směr větru je vždy u každého modelu udán šipkou, která představuje světovou stranu, odkud bude v danou hodinu vítr foukat. Posouzení směru šipky a její přiřazení do sektoru světové strany jsem musel provést subjektivně, a to hlavně v případě, kdy byl směr větru přesně na pomezí dvou světových stran. Rozhodnutí o přesném, konkrétním směru pomocí světové strany hrálo ve výsledku velkou roli, jelikož jsem zvolil takovou metodu vyhodnocení, ve které byla světová strana směru větru buď předpovězena naprosto správně a s nastalou skutečností se rovnala (JZ = JZ), nebo se lišila třeba jen o jednu z osmin světových stran a byla určena za nesprávnou (SV ≠ S), bez další tolerance, i když původně mohlo jít pouze o nepřesnost několika stupňů.

6.6 Relativní vlhkost

Do svého měření jsem zahrnul mimo jiné i relativní vlhkost vzduchu, která nám z podstaty své definice indikuje, jak vlhký je ve skutečnosti vzduch a jak moc se blíží své nasycené formě, která může vést ke srážkám. Ta se udává v procentech (%) a určuje tedy poměr aktuálního obsahu vodních par ve vzduchu a obsahu vodních par, které by vzduch měl při plném nasycení za stejného tlaku a teploty. Když relativní vlhkost dosáhne hodnoty 100 %, vzduch je maximálně nasycen vodními parami. Teplota, při které se toto děje, se nazývá rosný bod, který je též zahrnut v mém výzkumu. Relativní vlhkost vzduchu udávaly všechny veřejně dostupné předpovědi kromě Yr.no.

6.7 Atmosférický tlak

Atmosférický tlak (p) je v mém případě udán v hektopascalech (hPa) a zajímal by spíše leteckého uživatele, který si díky jeho předpovědím může například udělat představu, jak se vlivem nižšího a vyššího tlaku, než je standard podle MSA (1013 hPa), posouvají tlakové nadmořské výšky a letové hladiny. Obecně v letecké meteorologii platí, že čím je tlak vyšší, tím se skutečné tlakové výšky letových hladin rozšiřují a při nižším tlaku se zužují. Proto je třeba dát si při nižším tlaku, než je standard, pozor na létání v nízkých letových hladinách nad vysokými překážkami. Lehko se může stát, že vlivem nízkého tlaku letadlo poletí ve skutečnosti o několik set metrů níže, než si pilot na základě zvolené letové hladiny myslí, tedy souhrnem:

- $p < 1013 \text{ hPa} \rightarrow$ letová hladina $<$ skutečná tlaková výška
- $p > 1013 \text{ hPa} \rightarrow$ letová hladina $>$ skutečná tlaková výška
- $p \neq 1013 \text{ hPa} \rightarrow$ letová hladina \neq skutečná tlaková výška

6.8 Rosný bod

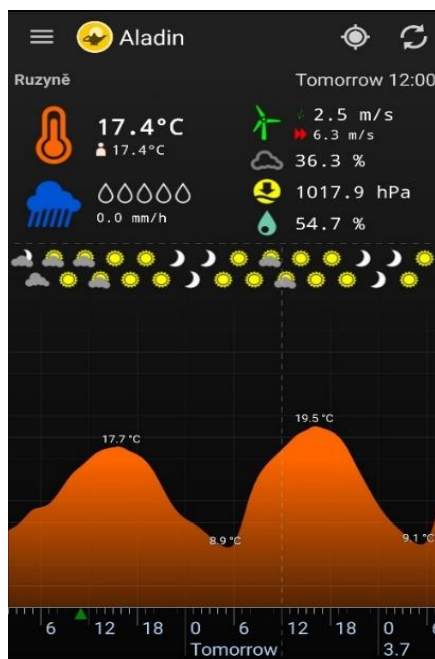
Rosný bod je poslední veličinou, která byla předmětem pozorování. Jak již bylo zmíněno o dva odstavce výše, rosný bod představuje hodnotu teploty, při které relativní vlhkost vzduchu dosáhne 100 %. Čím blíže jsou k sobě hodnoty aktuální teploty a aktuálního rosného bodu, tím lze očekávat vlhčí vzduch a pravděpodobnost tvorby mlhy, oblačnosti a případných následujících srážek. Naopak, když jsou tyto dvě teploty od sebe dostatečně vzdáleny, například o 10 °C, lze očekávat příznivé počasí s minimem kondenzačních projevů vodní páry obsažené ve vzduchu. Toto je jednoduchou pomůckou v letectví, jak si udělat přibližnou představu o počasí za letu, a v mých záznamech předpovědí s následným porovnáním skutečnosti bude tato teorie dostatečně ověřena. Rosný bod je, jakožto hodnota teploty, udáván ve stupních Celsia (°C), bohužel ho neudávala téměř polovina sledovaných předpovědí, takže je uváděn jako poslední a bral jsem ho jako malý bonus.

7 Průběh záznamů dat

7.1 Předpovědi modelu Aladin

Aladin vlastní svou aplikaci, ta dodává uživateli na jediné stránce dohromady sedm z osmi veličin, na které jsem se zaměřoval (chybí rosný bod). Všechny hodnoty jsou vyjádřeny pomocí čísel zaokrouhlených na desetiny. Předpovědi jsou dostupné pro intervaly jedné hodiny, a to pět hodin nazpět a 47 hodin dopředu. Konkrétní hodinu lze zvolit na horizontální časové ose dole v aplikaci, v mém případě jsem dle plánovaného postupu záznamu volil předpovědi na 24 hodin. V prostředí aplikace lze samozřejmě zvolit konkrétní oblast, která uživatele zajímá, přičemž se nabízí možnost využít GNSS modulu a vyhledat v okamžiku momentální počasí i jeho předpověď pro danou aktuální polohu. V případě mého výzkumu se nejbližše sledované lokaci, Letišti Václava Havla, blížila oblast Ruzyně, pro kterou jsem data z Aladina sbíral. Barevné provedení přidává na přehlednosti, ikony výstižně nahrazují chybějící popisky. V možnosti ovládání je možné přejíždět mezi pěti snímky, na kterých jsou k dispozici následně za sebou časové osy s hodinovým průběhem teploty, větru, oblačnosti, atmosférického tlaku a vlhkosti vzduchu. Z aplikace Aladin je taktéž jedním kliknutím možný rychlý přístup k meteoradaru ČHMÚ, který je obsahem spřažené externí mobilní aplikace s názvem Meteor. Zde je zobrazena mapa se srážkami a jejich odhadem postupu, zachycenými meteorologickým radarem. Na obrázku níže vidíme rozložení stránky z mobilní aplikace Aladin, přičemž znázorněné ikony zastávají hodnoty:

- Oranžový teploměr – teplota vzduchu ve $^{\circ}C$
- Modrý obláček – úhrn srážek v mm/h
- Zelený větrný mlýn – rychlost větru v kt
 - Zelená šipka u mlýnu – směr větru
- Šedý obláček – pokrytí oblačnosti
- Žlutá šipka směřující dolů – atmosférický tlak v hPa
- Zelená kapka – relativní vlhkost vzduchu v %



Obrázek 12: Ukázka dostupné 24hodinové předpovědi modelu Aladin na 02.07.2018
12:00 SELČ pro Ruzyni (Aladin, 2018)

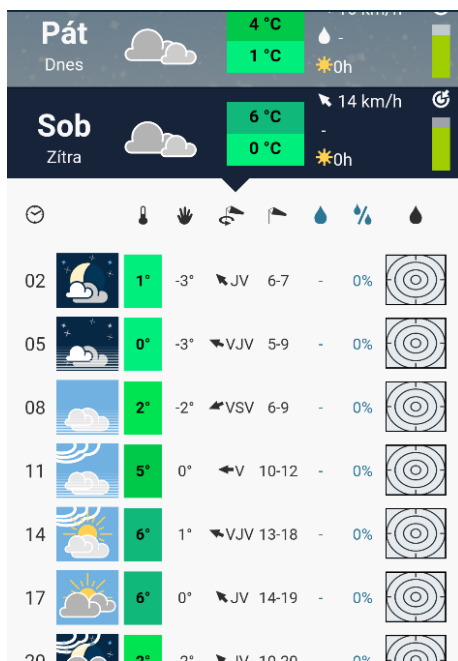
7.2 Předpovědi modelu Meteoblue

Data ze švýcarského předpovědního modelu jsem stahoval přímo z webové stránky Meteoblue. Z dat o počasí je zde na výběr z aktuálního počasí, předpovědí na 7 dní dopředu a 14 dní dopředu. Pro potřeby mé bakalářské práce jsem zvolil možnost zobrazení předpovědí na 7 dní, ze kterých jsem bral vždy data na následující den přímo pro oblast Letiště Václava Havla v Praze. Na internetové stránce je takto k dispozici rychlý přehled na právě sedm následujících dní, přičemž při rozkliknutí požadovaného dne se zobrazí podrobnější informace, které jsem do svého výzkumu plánoval zahrnout (chybí atmosférický tlak, rosný bod a v počátcích měření také hodnota vlhkosti vzduchu, viz níže). Meteoblue jako jediný zveřejňoval většinu pozorovaných veličin každý den pouze na časy, které o hodinu předbíhaly standardní předpovědní časy ostatních modelů. Tedy místo na 12 h, 15 h, 18 h mířil své prognózy na 11 h, 14 h, 17 h atd. Proto byl oproti zbylým modelům trochu znevýhodněn, jelikož jsem byl nucen hodnotit předpovědi na jednu konkrétní hodinu pro všechny a Meteoblue s časy zkrátka nenašel na modelové kolegy. Přesto jsem však počítal jeho předpovědi jako 24hodinové a porovnával stejnou mírou s ostatními modely. Jediná teplota, směr větru (udán jako šipka, bylo potřeba rozhodnout o přesném směru subjektivně) a rychlost větru v kilometrech za hodinu byly na webových stránkách Meteoblue o tabulku níže

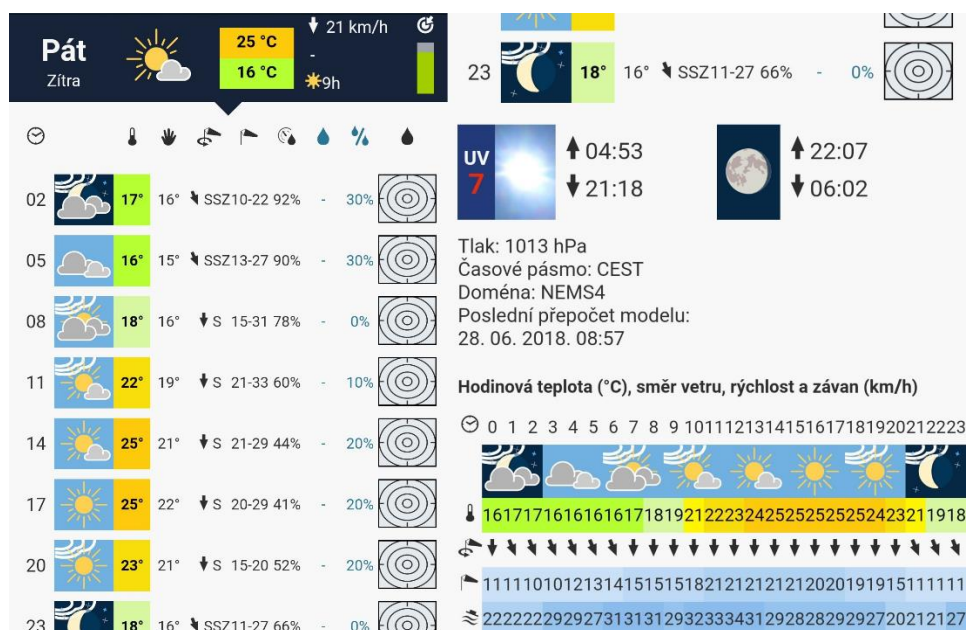
prognostikovány po jednotlivých hodinách na celých 24 hodin pro daný den. Rychlost větru jsem pro potřeby srovnání dat převáděl do stejných jednotek podle již zmíněného vzorce v kapitole 6.4:

- $m/s = \frac{km/h}{3,6}$

Ve výsledku jsem tedy převzal tyto tři výše zmíněné údaje z předpovědi na přesnou konkrétní hodinu jako u všech ostatních modelů a zbylé veličiny jsem byl nucen zaznamenat z řádku předpovědi pro hodinu dříve (tedy např. místo pro 18 h prognóza na 17 h). Jednotlivé atmosférické hodnoty jsem zaznamenával prakticky a podle dostupných možností, například stejně jako u Yr.no nabízela předpověď informaci o oblačnosti pouze symbolicky, viz obrázek níže. Z této symboliky sluníčka a obláčku jsem odečetl počet osmin pokrytí oblačnosti, kde se samozřejmě vyskytla určitá nepřesnost, ovšem lepším způsobem Meteoblue tuto hodnotu nevystihuje. Úhrn srážek je udáván v desetínách milimetrů, dokonce lze odečíst i pravděpodobnost srážek v procentech, ta ale bohužel nebyla předmětem mé práce. V mých záznamech, které začaly 9. března, zpočátku Meteoblue nezveřejňoval na svých stránkách vlhkost vzduchu, ta je u švýcarského modelu k vidění poprvé až od 5. dubna, kdy pravděpodobně nastala aktualizace škály publikovaných dat, ve které přišlo rozšíření právě o tuto veličinu, udávanou v procentech. Ukázka starší verze bez udané vlhkosti vzduchu i novější verze, zahrnující vlhkost vzduchu, je na následujících obrázcích:



Obrázek 13: Ukázka dostupné 24hodinové předpovědi modelu Meteoblue na 24.03.2018 11:00 (resp. 12:00) SEČ, bez publikované vlhkosti vzduchu (Meteoblue, 2018a)



Obrázek 14: Ukázka dostupné 24hodinové předpovědi modelu Meteoblue na 29.06.2018 08:00 (resp. 09:00) SELČ, již s publikovanou vlhkostí vzduchu (Meteoblue, 2018b)

Na obrázcích výše jsou pozorovaná data symbolicky udána takto:

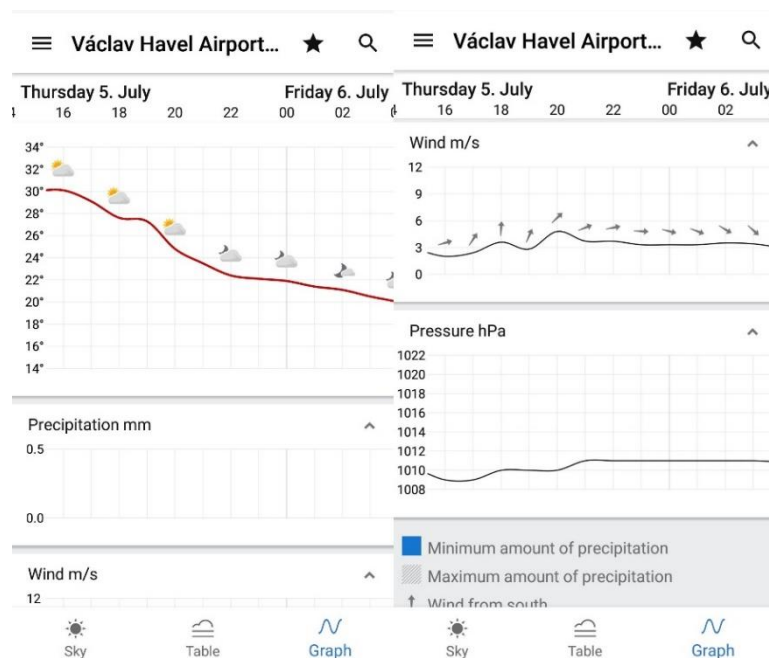
- Hodiny – čas ve zvoleném dni (v tomto případě následující den), pro který předpověď platí
- Nebe – pokrytí oblačnosti
- Teploměr – teplota vzduchu ve °C
- Větrný rukáv s šipkou okolo – směr větru
- Větrný rukáv – rychlost větru v *km/h*
- Kruhový ciferník s kapkou – vlhkost vzduchu v % (poprvé od 5. dubna)
- Modrá kapka – úhrn srážek v *mm/h*

7.3 Předpovědi modelu Yr.no

Tento norský model je v kruhu lidí, které znám, celkem oblíbeným zdrojem informací o počasí, sám s ním mám celkem dobré zkušenosti. V mobilní aplikaci bylo možné vybrat přímo oblast Letiště Václava Havla a k odečtení je vždy konkrétní čas s krokem po jedné hodině. Předpovědi Yr jsou provedeny velmi pohledně, na výběr jsou tři možnosti přehledu předpovědi počasí:

1. Animace nebe s propracovaným grafickým zobrazením stavu povětrnostních podmínek včetně teploty, oblačnosti, srážek, podloženo animací střídání dne a noci s časy východu a západu slunce; předpověď sahá až 34 hodin dopředu.
2. Tabulka s číselnými hodnotami základních veličin – teploty, větru a srážek; rozsah předpovědí je až devět dní dopředu
3. Graf, kde v řádku je znázorněna časová osa a ve sloupci číselné hodnoty dané pozorované veličiny; rozsah taktéž 34 hodin dopředu

Pro potřeby této bakalářské práce jsem ze tří možností zvolil onu poslední, tedy odečet hodnot z grafu. Tam oproti zbylým způsobům přehledu počasí v aplikaci Yr byla navíc uvedena hodnota předpovídaného atmosférického tlaku. Ve veřejně dostupných datech z mobilní aplikace Yr jsem nevyčetl vlhkost vzduchu ani rosný bod, takže ve srovnání těchto dvou veličin napříč všemi modely norský předpovědní portál nefiguruje. Jak jsem zmínil již dříve, při záznamu dat z grafu mohlo dojít k určité nepřesnosti při odečtu, rámcově několika desetín, a to hlavně u teploty, rychlosti větru a směru větru. Tlak byl v grafu zanesen vždy jako celé číslo, udaný v kroku po dvou *hPa*, kde se trajektorie grafu vyskytovala buď na jednom z těchto bodů, nebo přesně mezi nimi. Ostatní veličiny měly také vždy svůj definovaný krok, ale křivka v grafu nerespektovala celá čísla, a proto byly hodnoty v rozsahu desetinných čísel zaznamenávány odhadem, stejně jako bylo odhadováno pokrytí oblačnosti z teplotního grafu a přesný směr větru z grafu větru.



Obrázek 15: Ukázka dostupné 24hodinové předpovědi modelu Yr na 05.07.2018
21:00 SELČ (Yr.no, 2018b)

V předpovědi se pod sebou nacházely čtyři grafy, přičemž na ose x byl vždy čas krokovaný po hodinách

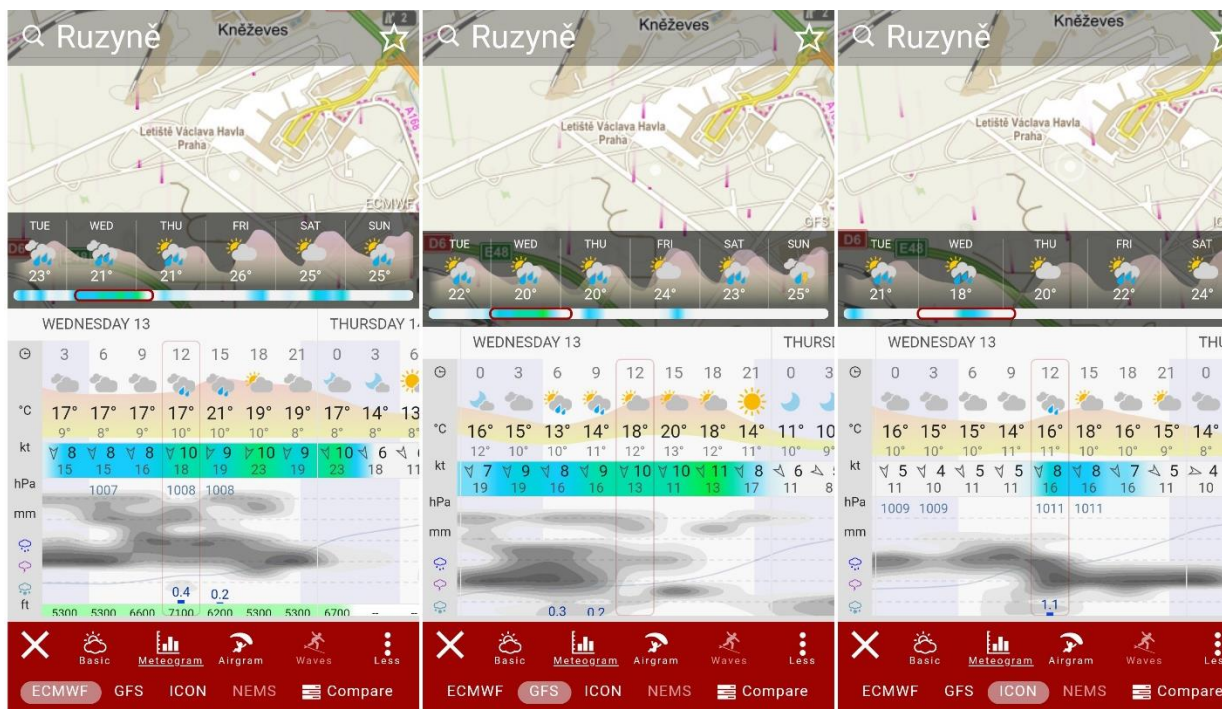
- Teplotní graf; na ose y hodnoty v $^{\circ}C$, navíc symbolika pokrytí oblačnosti pro každé dvě krokované hodiny
- Graf úhrnu srážek; na ose y hodnoty v mm/h
- Graf směru a rychlosti větru; na ose y rychlost větru v m/s , pro každou hodinu navíc směr větru udán šipkou
- Tlakový graf; na ose y hodnoty v hPa

7.4 Předpovědi modelů ECMWF, GFS a ICON

Tyto tři zahraniční, avšak světově rozšířené modely jsem pozoroval prostřednictvím známé české aplikace Windy, která je podporuje, jejich data zveřejňuje a je taktéž dostupná veřejnosti. Mobilní verze aplikace Windy nabízí předpovědi nespočteně mnoho meteorologických prvků jako je základna oblačnosti, mlhy, bouřky, typ srážek, teplota moří atd. Pro splnění účelu mé bakalářské práce tedy stačila více než dost, všechny tři modely podávaly předpovědní informace o všech sledovaných veličinách, a to až na celých devět dní dopředu pro takřka celý svět. Ovšem zaznamenat všechny tyto údaje trvalo u modelů ECMWF, GFS a ICON nejdelší dobu. Bylo to zapříčiněno tím, že v předpovědi pro danou oblast, čímž byla Ruzyně (v tomto případě jsem na mapě našel Letiště Václava Havla a přímo zde jsem vybral možnost předpovědi pro tuto oblast) byla jen část potřebných meteorologických prvků, načež vítr zde byl uveden v uzlech (kt), proto bylo třeba udělat převod na m/s podle následujícího vzorce:

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

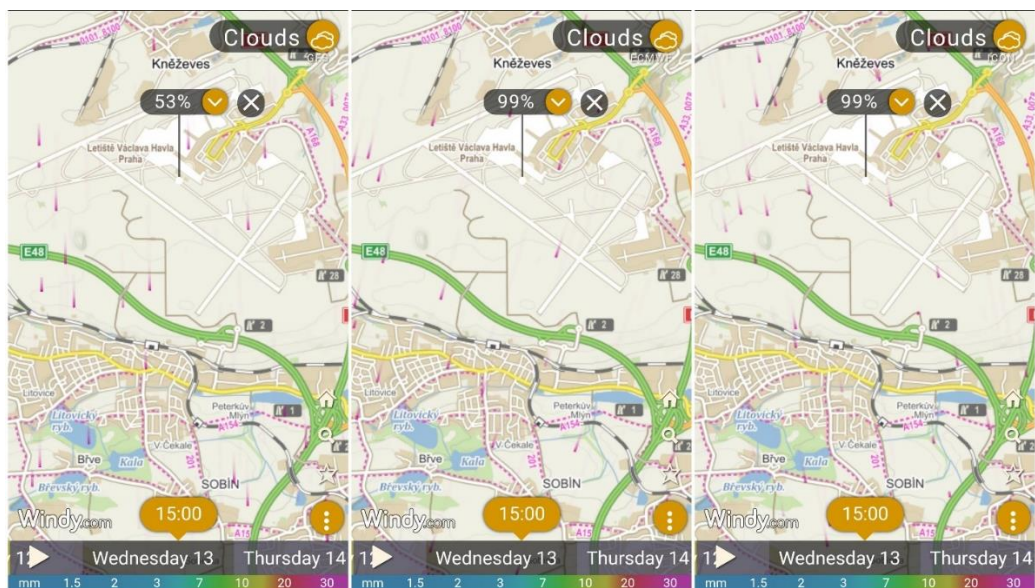
Zbytek měřených veličin (pokrytí oblačnosti, vlhkost a většinou i atmosférický tlak) bylo nutné dohledat individuálně v menu, přičemž se následně na zvolené oblasti zobrazila samotná hodnota požadované veličiny. Navíc jsem vždy pro konkrétní předpovědi musel přepínat mezi třemi modely, kdy se následně načítla předpověď podle právě zvoleného numerického modelu. Na obrázcích níže lze vidět, jakým způsobem jsem všechny žádané hodnoty pro modely ECMWF, GFS a ICON nastřádal dohromady pomocí několika snímků z obrazovky svého chytrého telefonu.



Obrázek 16: Ukázka dostupné 24hodinové předpovědi modelů ECMWF, GFS a ICON na 13.06.2018 12:00 SELČ (Windy, 2018)

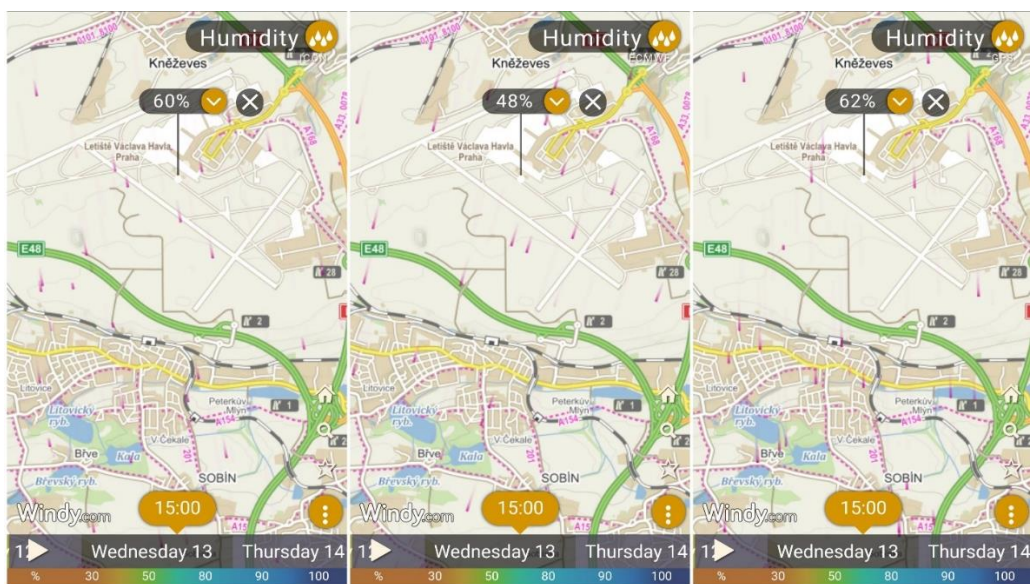
Na Obrázku 17 jsou základní předpovědi všech tří modelů – ECMWF, GFS a ICON. V nich se lze dočíst o teplotě, rosném bodu, rychlosti a směru větru, srážkách, a většinou i o atmosférickém tlaku. Ten, jak je vidět na obrázku, byl v této předpovědi zveřejněn pouze u ECMWF a ICON modelů, prostřední GFS zde jeho hodnotu nevedl, proto ji bude potřeba dohledat v aplikaci, viz Obrázek 20. Tyto základní předpovědi jsou publikovány vždy pevně na časy po třech hodinách, jako většina ostatních pozorovaných modelových prognóz. Legenda k Obrázku 17 je následující:

- Poloha – v horním řádku, automaticky zobrazena po zvolení oblasti na mapce
- Mapka – manuálně zvolená oblast
- Hodiny – předpovědní časy
- °C – teplota ve °C
- kt – šipka udávající směr větru a rychlost větru v kt
- hPa – atmosférický tlak v hPa
- dešťové obláčky – sloupec udávající úhrn srážek v mm/h
- spodní lišta – název zvoleného numerického modelu



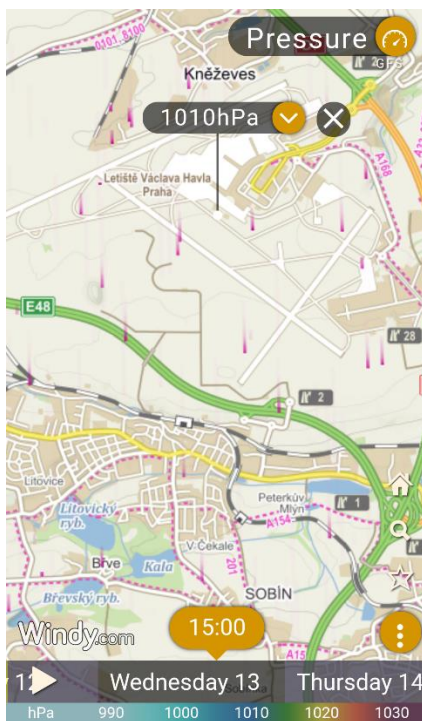
Obrázek 17: Ukázka dostupné 24hodinové předpovědi pokrytí oblačnosti modelů ECMWF, GFS a ICON na 13.06.2018 12:00 SELČ (Windy, 2018)

Předpovědi pokrytí oblačnosti jsem vždy pro každý jednotlivý model dohledal v aplikaci v záložce „Clouds“, kdy se po zvolení přesného času (zde bylo již možné volit s krokem jedné hodiny) na mapce zobrazila přesná hodnota prognóz



Obrázek 18: Ukázka dostupné 24hodinové předpovědi vlhkosti vzduchu modelů ECMWF, GFS a ICON na 13.06.2018 12:00 SELČ (Windy, 2018)

Obdobně jako pro oblačnosti jsem pro vlhkost využil individuální zobrazení se zvolením požadovaného času. V menu s výběrem meteorologických prvků jsem zvolil záložku „Humidity“ a následně zaznamenal procentuální hodnoty.



Obrázek 19: Ukázka dostupné 24hodinové předpovědi atmosférického tlaku modelu GFS na 13.06.2018 12:00 SELČ (Windy, 2018)

Pro případy, kdy z určitého, mně neznámého důvodu, nebyl atmosférický tlak publikován přímo v základní předpovědi konkrétního modelu, jsem dohledával jeho hodnotu stejným způsobem jako pokrytí oblačnosti a vlhkost vzduchu. V tomto případě hodnota tlaku chyběla pouze u modelu GFS, proto stačilo zachytit pouze jeden obrázek.

7.5 Předpovědi mobilní aplikace Klara

Jako jediný předpovědní portál nenazývám Klaru jako model, jelikož je to oficiálně mobilní aplikace, využívající data z norského NMI. Do svého měření jsem ji však také zahrnul, čistě z akademického hlediska a mého osobního vztahu k této aplikaci, jelikož jsem ji dosud aktivně využíval. Vedle Meteoradaru se jedná o další přidruženou externí aplikaci k mobilní aplikaci

Aladin. Tato aplikace je zpracována velmi přehledně a nabízí všechna data, která jsem se pro svůj výzkum rozhodl sledovat, od pokrytí oblačnosti až po rosný bod. Infrastruktura aplikace je velmi jednoduchá, po zvolení požadované polohy (v mém případě Ruzyně) se objeví, podobně jako u Aladina, časová osa. Tato časová osa je krokovaná po jedné hodině a je stejná pro všechny čtyři oddělené stránky, do kterých jsou předpovědi rozděleny. Tyto stránky nabízejí škálu meteorologických prvků, mezi kterými lze přepínat dle potřeby, viz následující obrázek.



Obrázek 20: Ukázka dostupné 24hodinové předpovědi portálu Klara na 03.08.2018 18:00 SELČ (Klara, 2018)

Symbols, hodnoty a grafy zobrazené na čtyřech obrázcích s předpověďmi výše představují následující prvky:

1. snímek – graf průběhu teploty s časem, přesná teplota pro zvolený čas, symbol kapiček znázorňuje úhrn srážek
2. snímek – graf průběhu větru s časem, přesná rychlost větru pro zvolený čas, šipka v kruhu znázorňuje směr větru
3. snímek – graf průběhu pokrytí oblačnosti s časem, přesné pokrytí oblačnosti pro zvolený čas
4. snímek – graf průběhu tlaku a vlhkosti s časem, přesný atmosférický tlak, rosný bod a relativní vlhkost vzduchu

7.6 Nastalá meteorologická situace

Pro ověření předpovědí, tedy k záznamu aktuálního stavu počasí v čase, na který byly předpovědi vydány a mnou pozorovány, jsem využil dat z meteorologické stanice ČHMÚ na Ruzyni. Ta vydávala zprávy o aktuálním počasí v dané oblasti pro každou hodinu po celý den, celý týden. Téměř vždy byla tato zpráva, zahrnující veškeré důležité atmosférické prvky, vydána přibližně 15 minut po uplynutí této hodiny. O hodinu později, 15 minut po uplynutí následující hodiny, byla zpráva opět aktualizována. Občas jsem se v průběhu pozorování setkal s tím, že byla informace o počasí vydána jen pár minut po celé, naopak v jednom případě, konkrétně dne 03.05.2018 byla zpráva o počasí zpožděna o více než 1,5 hodiny (pro čas 15:00 byla zveřejněna až přibližně v 16:40). Mnohokrát se mi při provádění praktické části bakalářské práce přihodila situace, kdy jsem jeden den zaznamenal všechny potřebné předpovědi, načež druhý den jsem zapomněl nebo nebyl s to dokončit proces tím, že bych zaznamenal právě nastalou meteorologickou situaci. V takovém případě byly původní předpovědi bezcenné a proto nebyly dále uchovány ani nijak použity. Stejně jsem postupoval i v případě, kdy jsem opomenul zachytit byť jen jedinou veličinu z jednoho modelu, čímž byla zachována objektivita a kompaktnost výzkumu. V přehledu počasí z profesionální meteorologické stanice na Ruzyni jsou pravidelně publikovány všechny meteorologické veličiny, které zajímají nejen můj výzkum o přesnosti numerických předpovědních modelů. Tyto naměřené hodnoty jsem posléze vkládal do tabulky MS Excel, čímž jsem uzavřel záznam dat potřebných ke zpracování statistiky.

PŘEHLED POČASÍ V ČESKÉ REPUBLICĚ	
HOME	
Praha-Ruzyně 31. 7. 2018 18:00 SELČ	
50,1003° sš 14,2555° vd 364 m n.m.	
Synoptické údaje	
Teplota vzduchu	33,3 °C
Teplota rosného bodu	11,2 °C
Relativní vlhkost vzduchu	26 %
Tlak vzduchu přepočtený na hladinu moře	1013,7 hPa
Tlaková tendence	-0,6 hPa
Tlak vzduchu na stanici	973,6 hPa
Rychlost větru	3 m/s (10,8 km/h)
Směr větru	severovýchodní (50 °)
Srážky za poslední hodinu	0,0 mm
Srážky za 6 hodin (od 8:00 do 14:00 SELČ)	0,0 mm
Oblačnost	Skoro jasno 2/8
Spodní vrstva oblačnosti	1/8 Cu 2400
Horizontální dohlednost	40 km

Obrázek 21: Ukázka dostupné meteorologické zprávy o aktuálním počasí na území Praha-Ruzyně ze dne 31.07.2018 18:00 SELČ (ČHMÚ, 2018b)

8 Zpracování dat

Zpracování dat začalo výpočtem absolutních hodnot odchylek veškerých naměřených dat od nastalých skutečností. Toho jsem docílil vytvořením druhého listu „Výpočty“ vedle prvního listu „Měření“ v programu MS Excel. Zde jsem pomocí funkce „ABS“ odečetl hodnotu nastalé situace od předpovídané hodnoty pro každou atmosférickou veličinu u každého z pozorovaných modelů. Pokud určitá veličina nebyla některým z modelů předpovídána a v listu „Měření“ bylo pole označeno „-“, bylo pomocí podmínkové funkce „IF“ zajištěno, že místo konkrétní číselné hodnoty se do pole symbolicky vypíše „neměřeno“ a toto pole nebude zahrnuto do statistických výpočtů. Tím tedy obsahuje list „Výpočty“ tabulku o hodnotách jednotlivých odchylek od skutečnosti, tedy o „kolik“ se předpověď pro daný prvek zmýlila, pokud ho vůbec předpovídala. To však neplatí pro data ze sloupce „směr větru“, kde jsem posuzoval pouze správnost předpovězeného směru pomocí funkce „IF“, kdy podmínka zněla, že pokud se rovná předpovězený směr větru se skutečným nastalým, předpověď je vyhodnocena jako správná, v případě opaku je označena

jako nesprávná. Poté jsem jednoduše sečetl počet správných předpovědí směru větru pro každý model a mezi sebou porovnal, čímž skončilo zpracování statistiky tohoto prvku.

K objektivní statistice všech ostatních veličin přichází na řadu potřeba najít prostředek, který k vytvoření dostatečné statistiky poslouží. Za vhodné prostředky pro užití v této bakalářské práci jsem zvolil programy *Paleontological Statistics verze 3.20* (dále PAST) a *Scilab verze 5.5.2* (dále Scilab). Tyto počítačové programy jsou schopny počítat škálu různých statistických testů a funkcí, některé z nich budou k této práci užitečné. Nejprve bylo třeba do programu PAST importovat všechna relevantní data z listu „Výpočty“ z programu MS Excel. Toho jsem docílil manuálním přepisem vypočítaných odchylek předpovědí do jednotlivých sloupců, každý sloupec pak patřil jednomu z modelů. Dále jsem na nahraná data aplikoval statistické testy, nejprve v programu PAST.

8.1 Využití statistických testů

Pro srovnání dat z modelových předpovědí jsem využil statistických testů. Zvolil jsem metodu porovnání středních hodnot všech souborů a následného porovnání rozptylů, čímž jsem dokázal zajít do jakési druhé úrovně a na základě svých dat testovat nejen to, jak přesně modely předpovídaly, ale také jak stabilně byly schopny předpovídat po celou dobu mého pozorování. Další pohled na přesnost předpovědí dodala vzájemná korelace všech veličin veškerých modelů s následným provedením testu o vzájemné nezávislosti. Všechny testy a funkce, které jsem použil, vysvětlím a popíšu v odstavcích níže, přičemž jsem k jejich definicím a popisům využil zápisky a učební materiály z přednášek předmětu Statistika, vyučovaném na ČVUT FD panem doc. Ing. Ivanem Nagym, CSc. a z cvičení téhož předmětu, vedeným panem Ing. Pavlem Provinským.

8.1.1 Pojmy

- *Parametrický test* – data z výběru pocházejí z konkrétního rozdělení pravděpodobnosti; v našem případě z rozdělení normálního, které je pro parametrický test nezbytné
- *Výběr* – soubor o určitém množství dat, v tomto případě jsou souborem konkrétní data jednotlivých veličin každého z modelů

- Normální rozdělení – je charakterizováno tzv. Gaussovou křivkou, jedná se o spojité rozdělení pravděpodobnosti popisující řadu veličin, jejichž hodnoty se shlukují kolem střední hodnoty
- *Skupinový test* – provádí se tehdy, když všechny testované soubory mají stejný počet prvků
- *Střední hodnota* – míra polohy, je to jakási očekávaná hodnota, populační průměr, nachází se přibližně ve středu rozmezí všech pozorovaných hodnot
- *Rozptyl* – vyjadřuje variabilitu rozdělení pravděpodobnosti, vypovídá o tom, jak moc se jednotlivé realizace náhodné veličiny mezi sebou liší; čím větší rozptyl je, tím větší je variace těchto realizací
- *Náhodná veličina* – jakákoli veličina, kterou lze opakovaně měřit s různými vnějšími podmínkami, a poté je podrobena statistickým metodám
- *Nulová hypotéza* – tvrzení o předpokládaném výsledku, který uvažujeme před provedením testu; pokud není vyvrácena, nulovou hypotézu nezamítáme
- *Alternativní hypotéza* – tvrzení popírající platnost nulové hypotézy; zamítneme-li na základě výsledku statistiky hypotézu nulovou, nastává situace alternativní
- *Hladina významnosti α*
 - zvolená hodnota pravděpodobnosti, kterou jsme ochotni riskovat možnost, že se ve výsledku, standardně při zamítání nulové hypotézy, mylíme
 - tato hodnota udává interval, do kterého se musí výsledek testu „trefit“, aby bylo možné zamítnout nulovou hypotézu
 - standardně se udává 5 %
 - pokud je výsledná p-hodnota větší než α , pravděpodobnost omylu je vyšší, než jsme ochotni riskovat a nulovou hypotézu nezamítáme
 - pokud je výsledná p-hodnota menší než α , nulovou hypotézu zpravidla zamítáme
- *p-hodnota*
 - udává, jestli je výsledek testu významný nebo jej lze zanedbat
 - hodnota vyskytující se ve výsledku testu, která udává pravděpodobnost výsledků, které ještě více svědčí proti nulové hypotéze
- *korelace*
 - určuje vzájemnou závislost mezi dvěma veličinami
 - korelační koeficient označován jako r
 - pokud je korelační koeficient r silný, jsou na sobě dvě veličiny pravděpodobně závislé, avšak není jisté, zda je jedna příčinou a druhá následkem

- pokud v jedné veličině dochází ke změně, korelativně se mění i druhá, tento proces je oboustranný
- nabývá hodnot pouze v intervalu $<-1;1>$; čím vyšší hodnota, tím silnější korelace
- *lineární závislost* – situace ve statistice, kdy jeden z vektorů je lineární kombinací druhého (zde jsou vektory soubory – modely o určitém počtu dat)

8.1.2 Porovnání středních hodnot

Pro porovnání středních hodnot více výběrů bylo potřeba zvolit vhodné parametrické skupinové testy. Na základě tzv. centrální limitní věty jsem docítil poznatku, že data ze všech mých souborů mají přibližně normální rozdělení, proto lze využít zmíněných parametrických testů. Centrální limitní věta říká, že pokud je dat dostatečné množství (z praxe Ústavu aplikované matematiky na ČVUT FD se považuje za dostatek dat 30 hodnot a více), má tento soubor přibližně normální rozdělení. Pro ověření, zdali se zásadně lišily střední hodnoty jednotlivých modelů, jsem zvolil parametrický skupinový test „dvojná ANOVA“, jehož výsledkem jsou dvě p-hodnoty – zvláště pro řádky a sloupce. Tento test přichází s nulovou hypotézou, že střední hodnoty všech souborů jsou shodné, nebo nevýrazně odlišné. Na zvolené hladině významnosti 5 % a při alternativní hypotéze, že střední hodnoty nejsou shodné, by musela výsledná p-hodnota vyjít méně než 5 %, abychom mohli nulovou hypotézu vyvrátit a potvrdit hypotézu alternativní. Tento test byl aplikován na všechny veličiny, kromě vlhkosti vzduchu. Vlhkost vzduchu mi zkomplikoval model Meteoblue, kdy data o této veličině začal dodávat až uprostřed mého výzkumu. Proto jsem zde zvolil test „jednocestná ANOVA“, který, stejně jako dvojná ANOVA, slouží k ověření shody středních hodnot. Tento test však, na rozdíl od dvojná ANOVY, počítá jednu p-hodnotu, a to pro všechna data dohromady, nikoli zvláště pro řádky a sloupce. Tím je tento test kvalitativně a spolehlivostně slabší než dvojná ANOVA, ale protože jej lze použít i pro nestejný počet dat, najde v tomto případě své uplatnění, jelikož ve sloupci Meteoblue chybí několik předpovědí o vlhkosti. Jednocestná ANOVA však, bohužel, není tak spolehlivá jako preciznější dvojná ANOVA, upřednostnil jsem však tuto degradaci výpočetního systému před zanedbáním dat všech ostatních modelů do doby, než začal vlhkost vzduchu předpovídat i Meteoblue. K oběma testům k ověření shody středních hodnot jsem využil programu PAST. Po aplikování dvojná ANOVY (jednocestné ANOVY pro vlhkost vzduchu) bylo dosaženo těchto výsledků:

Tabulka 1: Výsledky testu středních hodnot

	Teplota	Pokrytí oblačnosti	Úhrn srážek	Rychlost větru
p-hodnota	3,439 %	$2,843 \times 10^{-5}$ %	1,456 %	0,291 %
Nulová hypotéza	zamítnuta	zamítnuta	zamítnuta	zamítnuta
	Vlhkost vzduchu (jednocestná ANOVA)	Atmosférický tlak	Rosný bod	
p-hodnota	0,879 %	1,029 %	0,118 %	
Nulová hypotéza	zamítnuta	zamítnuta	zamítnuta	

Na základě výsledků z testů středních hodnot konstatuji, že středních hodnoty všech dat nejsou stejné, tudíž některé modely vykazaly buď prokazatelně horší nebo prokazatelně lepší výsledky než jiné. Tuto teorii ověřím kontrolou všech středních hodnot pro veškeré modely. Program PAST dokáže jednoduše spočítat střední hodnoty souborů funkcí „Summary statistics“ (viz *Příloha 6*), ze které jsem je vypsals do následující tabulky. Čím nižší je střední hodnota, tím přesnější předpovědi model vykazoval, jelikož jsem využil metodu, ve které jsem jako vstup využil spočítaných odchylek od nastalé skutečnosti v absolutní hodnotě. Zeleně jsou označeny nejnižší střední hodnoty a červeně jsou označeny nejhorší střední hodnoty.

Tabulka 2: Střední hodnoty veškerých veličin každého z modelů

	Aladin	Klara	Meteoblue	Yr	ICON	ECMWF	GFS
Teplota	1,409	1,638	1,377	1,532	1,406	1,817	1,754
Oblačnost	1,722	1,744	1,889	1,489	2,056	2,089	2,544
Srážky	0,177	0,252	0,271	0,286	0,232	0,272	0,517
Rychlost větru	1,284	1,213	1,641	1,173	1,327	1,261	1,209
Vlhkost	11,176	11,247	7,892	-	8,722	12,122	10,611
Tlak	1,236	0,811	-	0,899	0,773	0,916	1,002
Rosný bod	-	2,148	-	-	1,482	2,013	2,222

Z vypočítané statistiky středních hodnot dokážeme vyčíst, jak si předpovědní modely vedly v době mého měření v průměrné přesnosti. Pro lepší přehled bude v kapitole 9 tabulka se shrnutím předpovědí, které byly buď významně lepší nebo horší ve srovnání s ostatními.

8.1.3 Porovnání rozptylů

Jako druhý stupeň hodnocení kvality předpovědí jsem využil parametrického skupinového testu (Leveneova testu o shodě rozptylů), který ve své nulové hypotéze tvrdí, že rozptyly všech souborů jsou shodné. Odporující, alternativní hypotézou, je tvrzení, že rozptyly se významně liší. Jelikož se opět jedná o parametrický test, opět platí podmínka, že soubory dat musí mít normální rozdělení, čehož je i v tomto případě docíleno, na základě centrální limitní věty, dostatečným počtem dat (90 předpovědních dní). Porovnáním rozptylů v tomto výzkumu ověřím, jak stabilně dokázaly předpovědní portály předpovídat počasí. Pokud bude vyvrácena nulová hypotéza, tedy že rozptyly všech souborů nebudou podle testu shodné, porovnam jednotlivé hodnoty rozptylů

a určím, který z modelů předpovídal významně lépe nebo hůře. Čím větší rozptyl vykazovala data z jednotlivých souborů, tím hůře se dařilo stabilně předpovídat, jinými slovy kvalita dat výrazněji kolísala s měnícími se podmínkami a časem. Hladina významnosti byla opět předem stanovena na 5 %, tedy pokud výsledná p-hodnota vyjde menší než 5 %, budeme nulovou hypotézu zamítat a pátrat po rozdílech v rozptylech dále. Provedení Leveneova testu zajistil taktéž program PAST, výsledky z testů jsou zobrazeny v tabulce níže.

Tabulka 3: Výsledky testu shody rozptylů

	Teplota	Pokrytí oblačnosti	Úhrn srážek	Rychlost větru
p-hodnota	26,48 %	21,58 %	0,214 %	42,79 %
Nulová hypotéza	nezamítnuta	nezamítnuta	zamítnuta	nezamítnuta
	Vlhkost vzduchu	Atmosférický tlak	Rosný bod	
p-hodnota	4,857 %	4,803 %	1,946 %	
Nulová hypotéza	zamítnuta	zamítnuta	zamítnuta	

U čtyř ze sedmi veličin se podařilo vyvrátit hypotézu, že všechny soubory (data z modelů) mají stejný nebo velmi podobný rozptyl. U těchto prvků budeme pátrat po skutečných rozdílech rozptylů našich souborů dat. Program PAST dokáže jednotlivé rozptyly vypočítat, jejich hodnoty jsou znovu zaneseny v tabulce. Pro teplotu, pokrytí oblačnosti a rychlost větru bylo testem zjištěno, že se rozptyly příliš neliší, proto zde nelze říci, který z předpovědních modelů si stabilně vedl lépe nebo hůře.

Tabulka 4: Hodnoty rozptylů každého z modelů pro veličiny, u kterých byla vyvrácena shoda rozptylů

	Aladin	Klara	Meteoblue	Yr	ICON	ECMWF	GFS
Úhrn srážek	0,533	0,842	0,543	0,918	0,497	0,615	2,003
Vlhkost vzduchu	101,22	67,81	42,84	-	58,18	91,01	60,4
Atmosférický tlak	3,011	0,416	-	0,699	0,316	0,363	0,561
Rosný bod	-	4,446	-	-	2,002	3,208	3,107

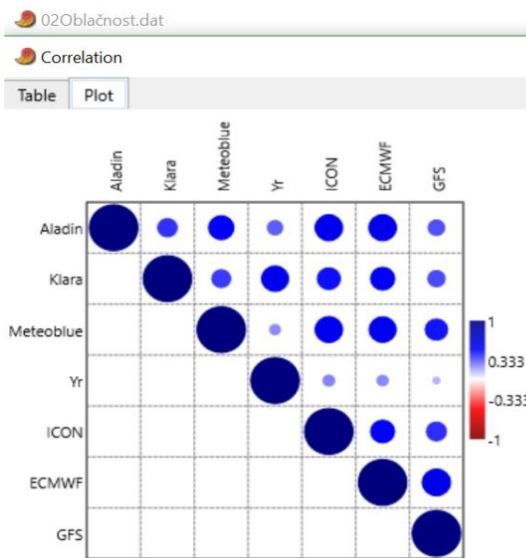
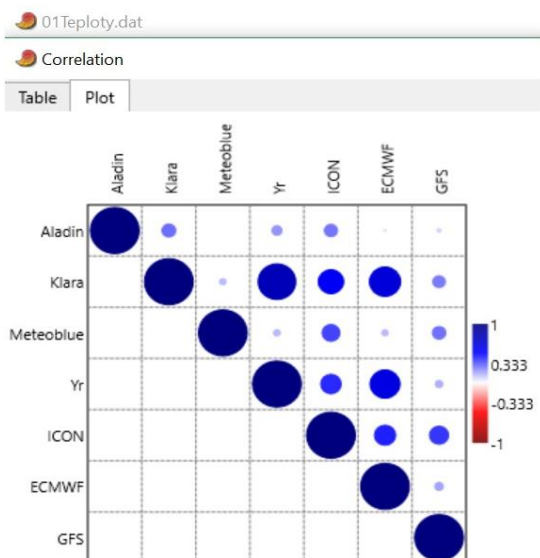
Z tabulky rozptylů je zřejmé, kdo předpovídal v průběhu pozorování se stabilními výsledky a komu předpovědi kolísaly v nepřesnostech. V tabulce, která se nachází v kapitole 9, je shrnutí významně lepších a významně horších předpovědí pro lepší přehled.

8.1.4 Porovnání vzájemné korelace

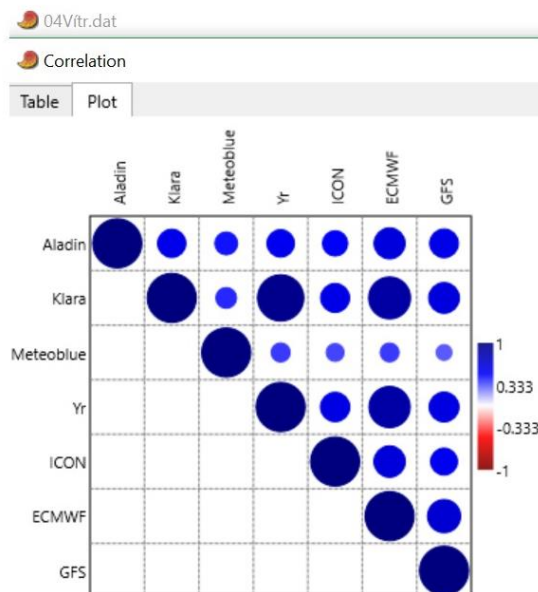
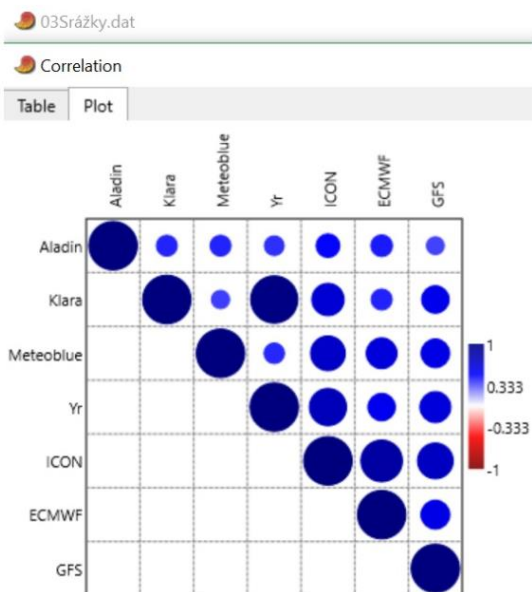
Dalším způsobem, jak ohodnotit výsledky předpovědí a zjistit vzájemný vztah mezi jednotlivými předpovědními portály, je korelace. Touto cestou docílím poznatků o tom, jak jsou na sobě jednotlivé předpovědi závislé. Cílem je tedy odhalit, jaké předpovědi mezi sebou standardně předpovídají s velikou podobností, a které se naopak ve většině případů liší, a to hlavně v nestandardních podmínkách, kdy může dojít k větším nepřesnostem. Druhá část zmíněného cíle nás bude zajímat více, protože by se takto dalo zjistit, na základě nejmenší vzájemné korelace, které dva modely předpovídají co nejvíce proti sobě, a tudíž při sledování těchto dvou předpovědí máme větší představu o tom, jaké počasí může teoreticky nastat a je větší pravděpodobnost, že budeme připraveni na obě, podle předpokladu různé, meteorologické situace. Z výsledků bude pro nejnižší korelace proveden Pearsonův test pro ověření nezávislosti předpovědí, jehož cílem bude otestovat, zda dva numerické modely opravdu předpovídají každý dostatečně rozdílně, tedy že jejich data nepocházejí ze stejného zdroje a nemylí se pravidelně stejným způsobem.

Jako příklad přínosu výpočtu vzájemné nezávislosti může být situace, kdy se podíváme na dva modely, které jsou lineárně závislé, oba předpovídají jasno. Nastane však ve skutečnosti situace, kdy je obloha zcela zatažena s mírnými srážkami. Dva modely toto nepředpověděly, oba se zmýlili, ale kdybychom se podívali na třetí model, k těmto dvěma modelům nezávislý, zjistili bychom, že jeho předpovědi hlásily zataženo s přeháňkami. Mou myšlenkou je tedy to, že by se ještě k přesnostem a stabilitě předpovědí, otestované dříve, přidalo i jakési doporučení, které dva, dostatečně přesné, modely sledovat, právě kvůli odlišnostem v předpovědích. Naopak, když oba tyto modely budou udávat podobnou podnební situaci, je vysoká pravděpodobnost, že můžeme skutečně očekávat předpovídané počasí.

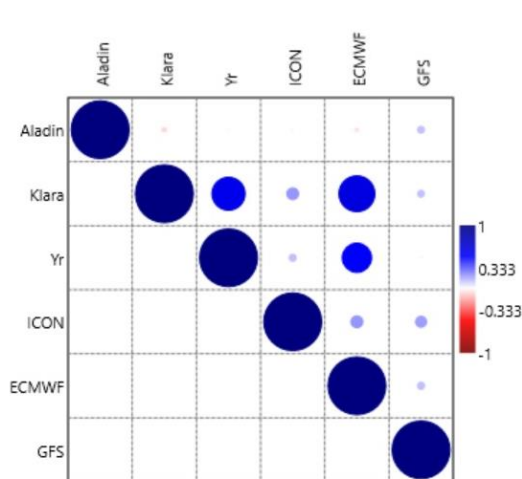
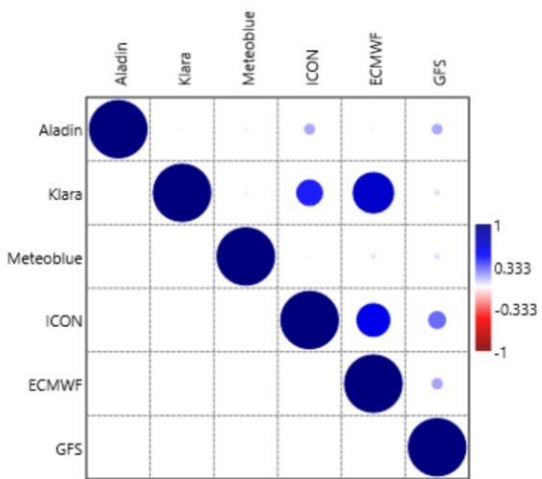
Pro určení vzájemné korelace mezi předpověďmi modelů jsem využil statistické funkce „Correlation“ v aplikaci PAST, a to pro každou ze sledovaných veličin. Některé modely mezi sebou korelovaly významněji než jiné, což by znamenalo, že mají buď podobné výsledky, plynoucí například z podobného zdroje dat, nebo se jejich předpovědi často rozcházejí. Výstupní grafy z programu PAST se zřetelnými korelacemi, resp. jejich silou, jsou zobrazeny níže. Tabulka je navržena ve formátu $m \times m$, přičemž na diagonále nabývá korelace hodnoty 1 (model sám se sebou logicky maximálně koreluje). Nad diagonálou jsou vzájemně mezi předpověďmi znázorněny pomocí modré barvy a velikosti kolečka síly korelace. Čím větší kolečko je a čím větší má průměr, tím silnější je vzájemná korelace. V případě, že je v grafu kolečko červené barvy, je korelace tzv. negativní, znamená to, že nastaly situace, kdy přesnost jedné předpovědi rostla, přesnost druhé předpovědi klesala a naopak. Škála síly korelace je na obrázcích s grafy zobrazena na pravé straně a pohybuje se v hodnotách od -1 do +1.



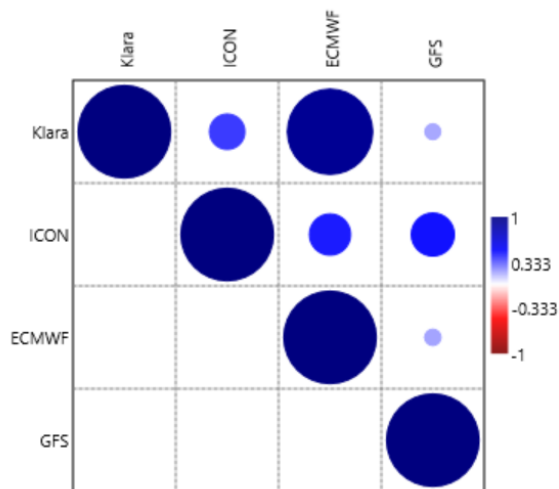
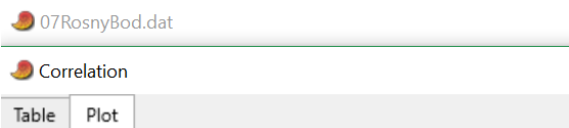
Obrázek 22: Grafy vzájemných korelací mezi modely pro teplotu a pokrytí oblačnosti (program PAST)



Obrázek 23: Grafy vzájemných korelací mezi modely pro úhrn srážek a rychlost větru (program PAST)



Obrázek 24: Grafy vzájemných korelací mezi modely pro vlhkost vzduchu a atmosférický tlak (program PAST)



Obrázek 25: Graf vzájemné korelace mezi modely pro rosný bod (program PAST)

Z výše uvedených grafů jsem vybral výrazně silné nebo slabé korelace a následně vypsals do přehledu. Tyto modely, které spojuje jeden ze dvou výrazných korelačních vztahů, podstoupí dále test nezávislosti.

1. Teplota:

- Silné korelace
 - Klara × Yr × ECMWF
- Slabé korelace
 - Aladin × Meteoblue
 - Aladin × ECMWF
 - Aladin × GFS

2. Pokrytí oblačnosti

- Silné korelace
 - Aladin × Meteoblue × ICON
 - Klara × Yr
 - ECMWF × GFS
 - Aladin × ECMWF
 - Meteoblue × ECMWF
- Slabé korelace
 - Yr × GFS

3. Úhrn srážek

- Silné korelace
 - Klara × Yr
 - ICON × ECMWF
- Slabé korelace
 - Klara × Meteoblue

4. Rychlost větru

- Silné korelace
 - Klara × Yr × ECMWF
- Slabé korelace
 - Meteoblue × GFS

5. Vlhkost vzduchu

- Silné korelace
 - Klara × ECMWF
- Slabé korelace (všechny se záporným r)
 - Meteoblue × ECMWF
 - Aladin × ECMWF
 - Klara × Meteoblue

6. Atmosférický tlak

- Silné korelace
 - Klara × Yr × ECMWF
- Slabé korelace
 - Aladin × Klara
 - Aladin × ECMWF
 - Yr × GFS
 - Aladin × Yr

7. Rosný bod

- Silné korelace
 - Klara × ECMWF
- Slabé korelace
 - Klara × GFS
 - ECMWF × GFS

8.1.5 Ověření lineární nezávislosti

Po vypočítání korelace všech dat a výběru poměrně silných a slabých korelačních vztahů přichází na řadu tzv. Pearsonův test. Ten nám ve výsledku udává, jak silná je lineární závislost mezi dvěma párovými výběry. Jelikož jde o parametrický test, pro jeho výpočet je opět zapotřebí normálního rozdělení, které uvažujeme díky dostatečnému množství vstupních dat. Pro vybrané silnější korelační vazby ověříme, zdali jsou na sobě data závislá, pro slabší vazby zjistíme, jestli jsou skutečně data z výběrů mezi sebou nezávislá. Pearsonův test jsem provedl pomocí programu Scilab. Data jsem kopíroval z programu PAST, ovšem zde vznikl problém, jelikož PAST využívá desetinných čárek pomocí znaku čárky, zatímco Scilab jako desetinnou čárku využívá tečku. Proto

jsem nejprve nahrál číselné hodnoty do programu *WordPad verze 1803*, kde jsem funkcí „nahradit“ dokázal přepsat desetinnou čárku na desetinnou tečku. Posléze jsem nahrál upravené hodnoty do programu *Scilab* jako vektory A a B. Tyto vektory sloužily jako vstupní data pro funkci „pearson_test“. Tato funkce pochází ze statistického balíčku ČVUT FD, laskavě dodaném panem Ing. Pavlem Provinským a je navržena právě pro výpočet Pearsonova testu lineární nezávislosti náhodných veličin. Hladinou významnosti byla zvolena standardně $\alpha = 5\%$ a ve výsledku nás tedy zajímá především p-hodnota. Nulová hypotéza říká, že dvě testované veličiny jsou lineárně nezávislé, alternativní hypotéza vyvrací tvrzení a říká, že veličiny jsou lineárně závislé. V následujících tabulkách platí, že pokud nebyla nulová hypotéza zamítnuta, nejsou dva testované modely lineárně závislé, naopak při zamítnutí nulové hypotézy platí lineární závislost mezi těmito dvěma modely.

Tabulka 5: Výsledky testu lineární nezávislosti pro teplotu

<i>Teplota</i>	Silné korelace		
Porovnávané modely	Klara × Yr	Klara × ECMWF	Yr × ECMWF
p-hodnota	$4,86 \times 10^{-19} \%$	$1,24 \times 10^{-11} \%$	$1,36 \times 10^{-10} \%$
Nulová hypotéza	zamítnuta	zamítnuta	zamítnuta
<i>Teplota</i>	Slabé korelace		
Porovnávané modely	Aladin × Meteoblue	Aladin × ECMWF	Aladin × GFS
p-hodnota	93,75 %	62,84 %	43,27 %
Nulová hypotéza	nezamítnuta	nezamítnuta	nezamítnuta

Tabulka 6: Výsledky testu lineární nezávislosti pro pokrytí oblačnosti

<i>Pokrytí oblačnosti</i>	Silné korelace		
Porovnávané modely	Aladin × Meteoblue	Aladin × ICON	Meteoblue × ICON
p-hodnota	$1,47 \times 10^{-7} \%$	$5,63 \times 10^{-9} \%$	$6,92 \times 10^{-9} \%$
Nulová hypotéza	zamítnuta	zamítnuta	zamítnuta
<i>Pokrytí oblačnosti</i>	Silné korelace		
Porovnávané modely	Klara × Yr	ECMWF × GFS	Aladin × ECMWF
p-hodnota	$1,44 \times 10^{-8} \%$	$1,68 \times 10^{-9} \%$	$5,32 \times 10^{-9} \%$
Nulová hypotéza	zamítnuta	zamítnuta	zamítnuta
<i>Pokrytí oblačnosti</i>	Silné korelace	Slabé korelace	
Porovnávané modely	Meteoblue × ECMWF	Yr × GFS	
p-hodnota	$1,44 \times 10^{-8} \%$	17,39 %	
Nulová hypotéza	zamítnuta	nezamítnuta	

Tabulka 7: Výsledky testu lineární nezávislosti pro úhrn srážek

<i>Úhrn srážek</i>	Silné korelace		Slabé korelace
Porovnávané modely	Klara × Yr	ICON × ECMWF	Klara × Meteoblue
p-hodnota	$8,81 \times 10^{-59} \%$	$2,87 \times 10^{-27} \%$	0,024 %
Nulová hypotéza	zamítnuta	zamítnuta	zamítnuta

Tabulka 8: Výsledky testu lineární nezávislosti pro rychlost větru

<i>Rychlost větru</i>	Silné korelace			Slabé korelace
Porovnávané modely	Klara × Yr	Klara × ECMWF	Yr × ECMWF	Meteoblue × GFS
p-hodnota	$6,52 \times 10^{-44} \%$	$1,08 \times 10^{-26} \%$	$4,23 \times 10^{-25} \%$	0,197 %
Nulová hypotéza	zamítnuta	zamítnuta	zamítnuta	zamítnuta

Tabulka 9: Výsledky testu lineární nezávislosti pro vlhkost vzduchu

<i>Vlhkost vzduchu</i>	Silné korelace	Slabé korelace		
Porovnávané modely	Klara × ECMWF	Meteoblue × ECMWF	Aladin × ECMWF	Klara × Meteoblue
p-hodnota	$1,39 \times 10^{-14} \%$	58,9 %	77,4 %	71,7 %
Nulová hypotéza	zamítnuta	nezamítnuta	nezamítnuta	nezamítnuta

U výpočtu lineární nezávislosti vlhkosti bylo potřeba ošetřit problém s chybějícími daty švýcarského modelu Meteoblue, jelikož je Pearsonův test parametrickým testem a vyžaduje mimo normality také stejný počet dat v testovaných souborech. V tomto případě jsem řešil tento zádrhel porovnáním pouze předpovědí, které udávaly oba modely, tedy při porovnávání Meteoblue s ECMWF a s Klarou jsem zahrnul do výpočtu pouze předpovědi vlhkosti až od 17. předpovědního dne. Výsledek testu by tento krok neměl nijak zásadně ovlivnit, což ukazuje tabulka výše, kde bylo jednoznačně potvrzeno, že modely korelovaly s Meteoblue minimálně a lineárně nezávisle.

Tabulka 10: Výsledky testu lineární nezávislosti pro atmosférický tlak

<i>Atmosférický tlak</i>	Silné korelace			
Porovnávané modely	Klara × Yr	Klara × ECMWF	Yr × ECMWF	
p-hodnota	$3,89 \times 10^{-9} \%$	$6,96 \times 10^{-11} \%$	$3,47 \times 10^{-7} \%$	
Nulová hypotéza	zamítnuta	zamítnuta	zamítnuta	
<i>Atmosférický tlak</i>	Slabé korelace			
Porovnávané modely	Aladin × Klara	Aladin × ECMWF	Yr × GFS	Aladin × Yr
p-hodnota	46,5 %	58,1 %	79,7 %	87,7 %
Nulová hypotéza	nezamítnuta	nezamítnuta	nezamítnuta	nezamítnuta

Tabulka 11: Výsledky testu lineární nezávislosti pro rosný bod

Rosný bod	Silné korelace	Slabé korelace	
Porovnávané modely	Klara × ECMWF	Klara × GFS	ECMWF × GFS
p-hodnota	$1,14 \times 10^{-37} \%$	10,86 %	9,5 %
Nulová hypotéza	zamítnuta	nezamítnuta	nezamítnuta

8.2 Alternativní zpracování dat o směru větru

Jak bylo avizováno dříve, směr větru jsem ve svém zpracování provedl odlišně od ostatních meteorologických veličin. V této disciplíně byly modely hodnoceny podle toho, jestli dokázaly správně určit jasně definovaný směr větru, který byl druhým dnem pro konkrétní hodinu takto publikován ČHMÚ. Vyhodnocení probíhalo v programu MS Excel, kde byla vytvořena podmínka, která definuje jasně, že pokud se předpovídaný směr větru přesně shoduje s nastalou skutečností, předpověď je určena jako správná. Pokud se tento směr původně lišil, byť jen o pár stupňů, byl označen jako nesprávný. Směr větru byl rozdělen do osmi světových stran, které byly předmětem hodnocení. Výsledky udané v procentech a vypočítané na základě počtu úspěšných prognóz vůči celkovému počtu předpovědí jsou uvedeny v tabulce níže. Tabulka je doplněna o sestupné pořadí nejúspěšnějších modelů.

Tabulka 12: Porovnání procentuální úspěšnosti modelů v předpovídání směru větru

	Aladin	Klara	Meteoblue	Yr	ICON	ECMWF	GFS
Počet správných předpovědí	45/90	47/90	44/90	50/90	47/90	49/90	49/90
Procentuální úspěšnost	50 %	52 %	49 %	56 %	52 %	54 %	54 %
Pořadí	6.	4.-5.	7.	1.	4.-5.	2.-3.	2.-3.

Směr větru z této statistiky může sloužit k přehledu o tom, že se všechny předmětné předpovědní modely pohybují se svou přesností kolem 50 %. Nemůžeme však objektivně usoudit, že by byl v tomto ohledu jeden z modelů výrazně lepší nebo horší. Za období od března do srpna roku 2018 se nejlépe v odhadu směru větru dařilo norskému modelu Yr, nejnižší procento úspěšnosti vykázal švýcarský model Meteoblue.

9 Vyhodnocení

Pomocí statistických testů provedených v programech *Paleontological Statistics* verze 3.20 a *Scilab* verze 5.5.2 bylo možné nashromážděná data otestovat, porovnat a výsledky nyní budou přehledně shrnuty.

Při testování shody středních hodnot veškerých atmosférických veličin pro všechny modely bylo zjištěno, že se střední hodnoty mezi modely prokazatelně liší, což bylo impulsem pro pátrání po konkrétních hodnotách. V *Tabulce 2* jsou zaznamenány přesné hodnoty středních hodnot odchylek, na následující tabulce je výpis modelů, které byly určeny za nejpřesnější a nejméně přesné, pro každou pozorovanou veličinu. Pokud se v buňce „Výrazně lepší“ pro jeden prvek nachází více předpovědních modelů, bylo jejich skóre přibližně srovnatelné, seřazeny jsou sestupně podle pořadí. Totéž platí pro buňky „Výrazně horší“ s výjimkou, že v případech více modelů

v jednom poli je pořadí sestaveno vzestupně od „nejhoršího“. Tato metoda měla za úkol určit, který z modelů předpovídal přesněji na základě střední hodnoty odchylek, čím menší měl model tuto hodnotu, tím přesnější jeho prognózy byly.

Tabulka 13: Přehled výrazně lepších a horších předpovědí pro jednotlivé atmosférické prvky podle středních hodnot

	Teplota	Oblačnost	Srážky	Rychlost větru	Vlhkost	Tlak	Rosný bod
Výrazně lepší	Meteoblue ICON Aladin	Yr	Aladin	Yr GFS Klara	Meteoblue ICON	ICON Klara	ICON
Výrazně horší	ECMWF GFS	GFS	GFS	Meteoblue	ECMWF	Aladin	GFS

Následovalo testování shody rozptylů všech modelů, kde bylo na hladině významnosti $\alpha = 5\%$ prokázáno, že ve čtyřech veličinách (úhrn srážek, vlhkost vzduchu, atmosférický tlak, rosný bod) došlo mezi modely k významnému rozdílu v rozptylech. Po aplikování další statistické funkce byly dostupné potřebné rozptyly předpovědí a pro takto identifikované veličiny byla vytvořena tabulka s konkrétními hodnotami rozptylů. V této kapitole je dostupná tabulka, kde jsou výsledky porovnávání shody rozptylů shrnuty. Jak již bylo řečeno dříve, touto metodou byla ověřena schopnost předpovědních portálů prognostikovat vedle přesnosti také stabilně, to bylo definováno jako druhé kritérium kvalitních předpovědí.

Tabulka 14: Přehled výrazně lepších a horších předpovědí pro jednotlivé atmosférické prvky podle rozptylů

	Úhrn srážek	Vlhkost	Tlak	Rosný bod
Výrazně lepší	ICON Aladin Meteoblue	Meteoblue	ICON ECMWF	ICON
Výrazně horší	GFS	Aladin ECMWF	Aladin	Klara

Jako další metodu porovnání jednotlivých modelů jsem počítal vzájemnou korelaci. Z grafů v kapitole 8.1.4 bylo zřejmé, že některé z modelů mezi sebou korelují více a některé méně. Mým cílem bylo významně silné a významně slabé korelace identifikovat a dále testovat pomocí testu lineární nezávislosti. Tímto způsobem jsem ověřil, jak se předpovědi sobě navzájem podobaly, jestli například neodebíraly vstupní data ze stejného zdroje atd. Výborným exemplářem se stal norský předpovědní portál Yr, model ECMWF a předpovědní aplikace Klara. Již v teoretické části jsem se o modelech rozepsal, kde jsem zmínil, že Yr a Klara odebírají část vstupních dat z norského NMI a Yr navíc vychází z modelu ECMWF. V praxi to bylo prokázáno velmi dobře, kdy se předpovědi zejména mezi Yr a Klarou velice podobaly a měly takřka vždy velmi silnou korelaci (celkem u pěti prvků). Velký počet tabulek z kapitoly 8.1.4 nyní shrnu do jednoduššího vyhodnocení:

Lineární závislost byla testy prokázána mezi těmito předpovědními portály, u těchto sledovaných veličin:

- Klara × ECMWF
 - 5x – všechny pozorované prvky vyjma pokrytí oblačnosti a úhrnu srážek
- Klara × Yr
 - 5x – všechny pozorované prvky vyjma vlhkosti vzduchu a atmosférického tlaku (tyto dvě veličiny Yr ve svých předpovědích nepublikoval)
- Yr × ECMWF
 - 3x – teplota, rychlost větru, atmosférický tlak

Tento výsledek skutečně potvrzuje, že všechny tři předpovědní portály vycházejí z podobných zdrojů meteorologických dat.

Ostatním modelům byla buď potvrzena, nebo nebyla vyvrácena lineární nezávislost, tudíž předpokládám, že předpovědi zbylých modelů jsou skutečně nezávislé.

Výsledky ze srovnání přesností prognóz větru v kapitole 8.2 nepřinesly příliš objasňující data, všechny modely vykazaly pravděpodobnost úspěšné předpovědi směru větru okolo 50 %.

10 Závěr

V této práci jsem se zabýval meteorologií, zejména předpověďmi počasí poskytovanými numerickými modely, a to přímo pro specifickou oblast Letiště Václava Havla v Praze. Tyto modely jsou vyvíjeny v různých zemích světa a každý používá svůj princip a prostředky, cílem této práce bylo tyto metody porovnat a případně ohodnotit na základě objektivních dat, jak kvalitní předpovědi jednotlivé modely poskytovaly. Po teoretickém úvodu, kde dostal prostor vývoj meteorologie, pozorování počasí a jeho předpovídání, jsem se zaměřil na konkrétní numerické modely. Informace použité v této práci jsem čerpal z mnoha zdrojů, zejména z internetových a knižních, včetně vlastních zápisků z vyučovacích hodin při studiu na ČVUT FD.

Po představení základů a principů fungování výpočetních systémů předpovědních modelů jsem se pustil do zpracování dat, která jsem shromažďoval přibližně půl roku. Zpracování spočívalo v záznamu naměřených hodnot do tabulek, propočítání absolutních hodnot skutečných odchylek od nastalé skutečnosti (vše prostřednictvím programu Microsoft Excel) a následným aplikováním statistických testů na tyto odchylky. Již při zaznamenávání dat jsem si povšiml faktu, že když bylo předpovídáno obecně nevšední počasí (bouřky, silné deště aj.), prognózy se mezi sebou začaly velmi lišit, tyto momenty pravděpodobně ve výsledku zásadně ovlivnily výstup ze statistiky. Statistické testy jsem prováděl v počítačových programech *Paleontological Statistics* verze 3.20 a *Scilab* verze 5.5.2 za pomoci statistických balíčků pana doc. Ing. Ivana Nagye, CSc., dodaných panem Ing. Pavlem Provinským z Ústavu aplikované matematiky na ČVUT FD.

Při testování jsem zvolil několik základních kritérií, které bylo v plánu ověřit, a to v první řadě přesnost a stabilitu předpovědí. Přesnost jsem ověřil spočítáním a následným porovnáním středních hodnot odchylek od skutečné meteorologické situace. Stabilita přesnosti předpovědí byla zhodnocena porovnáním vypočítaných rozptylů těchto odchylek. Posledním testováním bylo

porovnání vzájemné závislosti mezi modely, kdy se testovala síla korelace a následně ona lineární nezávislost.

Závěrem této bakalářské práce mělo být porovnání a určité doporučení dostupných předpovědních modelů, a to jak pro civilního, tak leteckého uživatele, z hlediska osobních potřeb. Na základě testování mnou naměřených hodnot z veřejně dostupných webových stránek a mobilních aplikací všech předmětných modelů jsem se dobral uspokojivých výsledků, které přinesly zajímavé poznatky. Při závěrečném zhodnocení budu vycházet ze shrnutí výsledků dostupných v kapitole 9. Obecně nejlépe v tomto výzkumu dopadly na první pohled modely ICON (třikrát výrazně lepší v přesnosti, třikrát výrazně lepší ve stabilitě, ani jednou výrazně horší oproti ostatním modelům) a Meteoblue (dvakrát výrazně lepší v přesnosti, dvakrát výrazně lepší ve stabilitě a pouze jednou výrazně horší oproti ostatním modelům).

Ovšem při doporučení specifickému uživateli se musí brát ohled na konkrétní požadavky, civilního uživatele bude zajímat především teplota, úhrn srážek, v poslední řadě pravděpodobně rychlost větru nebo pokrytí oblačnosti. Takovému uživateli bych ze svých výsledků měření a nabytých zkušeností při vypracovávání této práce doporučil využít na území České republiky modelů Aladin a Yr, které si v těchto aspektech vedly velmi dobře. Ovšem nutno podotknout, že statistika nevyklučuje v zásadě žádný z modelů, viz zpracování a vyhodnocení v kapitolách 8 a 9.

Uživateli, který potřebuje co nejlepší informace o nadcházející meteorologické situaci především pro spokojený výkon své profese nebo koníčka, tj. zejména leteckému uživateli, nejsem oprávněn dávat žádné formální doporučení. V dnešní době, v letectví na území České republiky, je Český hydrometeorologický ústav a jeho přidružený numerický model Aladin jediným oficiálním zdrojem meteorologických dat pro letecké uživatele. Proto jsou mé výsledky z pozorování publikovány pouze jako poznatky a eventuálně mohou posloužit českému ÚCL jako podnět pro eventuelní zlepšování meteorologických služeb v letectví na území České republiky. V letectví je primární znalost prakticky všech mnou pozorovaných veličin. Existuje mnoho důvodů, proč je vhodné mít v letectví přesné a spolehlivé předpovědi, aby si uživatel dokázal udělat obrázek o nadcházející situaci. Například teplota je důležitá z pohledu výkonnosti letadel a funkčnosti barometrických výškoměrů, pokrytí oblačnosti z důvodu letových minim, úhrn srážek kvůli očekávaným podmínkám snížené dohlednosti a námrazy, rychlost a směr větru kvůli snosu a limitům na vzlet a přistání, vlhkost vzduchu a rosný bod indikují pravděpodobnost tvorby oblačnosti, mlh, srážek, atmosférický tlak má vliv na systém letových hladin atd. Pro spolehlivý informativní účel bych leteckému uživateli podle svých statistik nezávisle doporučil modely ICON a Meteoblue. S vysokou přesností a pevnou stabilitou předpovědí vyprodukovaly nejspolehlivější předpovědi.

Posledním kritériem, vzájemnou lineární nezávislostí, jsem zjistil, že většina modelů předpovídá naprosto nezávisle na sobě. Pouze modely Yr, ECMWF a předpovědní aplikace Klara se ukázaly jako lineárně závislé, tedy že často předpovídají víceméně se stejnou tendencí a trendem. Tento poznatek potvrzuje, zejména u Yr a Klary, že tyto dva zdroje vycházejí ze stejných dat, a to z norského meteorologického institutu. Taktéž se díky výsledkům testování prokazatelně potvrdilo, že Yr využívá ke svým prognózám mj. modelu ECMWF. Proto nedoporučuji při volbě získávání meteorologických informací z více zdrojů používat více než jeden z těchto tří modelů současně, jelikož uživatel získá pouze sobě velmi podobné předpovědi, přičemž mohou být i podobně nepřesné. Doporučuji využití porovnání více modelů, které nejsou lineárně závislé, čímž se zvýší pravděpodobnost, že alespoň jeden z modelů se bude blížit k předpovídané skutečnosti.

Ve své bakalářské práci jsem se soustředil na sedm veřejně dostupných zdrojů meteorologických informací, přičemž data jsem shromažďoval po dobu necelých šesti měsíců. Myslím si, že by bylo vhodné tento výzkum rozšířit o další dostupné numerické předpovědní modely a provést pozorování po dobu celého roku pro všechna roční období, aby byla statistika objektivnější a směrodatnější. Rád bych na tento výzkum navázal ve své diplomové práci.

Literatura

Aladin (2018). *Předpovědi modelu Aladin* [online]. Dostupné dne 01.07.2018 z mobilní aplikace Aladin.

BaselArea (2017, 12. duben). *World's most accurate weather forecast comes from Basel* [online]. Dostupné z <https://www.baselarea.swiss/baselarea-swiss/channels/innovation-report/2017/04/Worlds-most-accurate-weather-forecast-comes-from-Basel.html>

Bednář, J. (2003). *Meteorologie: úvod do studia dějů v zemské atmosféře*. Praha: Portál

CAE Oxford Aviation Academy (2014). *050 Meteorology (ATPL Ground Training Series)*. Oxford: CAE Aviation Academy

ČHMÚ (2018a). *Model ALADIN* [online].

Dostupné z <http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/ov/aladin/>

ČHMÚ (2018b). *Přehled počasí v České republice, Praha – Ruzyně* [online]. Dostupné dne 31.07.2018 z <http://portal.chmi.cz/aktualni-situace/aktualni-stav-pocasi/ceska-republika/stanice/profesionalni-stanice/mapy#>

ČHMÚ (2018c). *Předpovědi modelu Aladin* [online].

Dostupné dne 21.06.2018 z <http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/ov/aladin/results/ala.html#prec,nebul?>

ČHMÚ (2018d). *Předpovědní synoptická mapa Evropy* [online].

Dostupné dne 01.05.2018 z <http://portal.chmi.cz/predpovedi/predpovedi-pocasi/evropa/synopticka-situace>

ČHMÚ (2018e). *Základní aerologické měření* [online].

Dostupné z http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/oa/sondaz_PTU_vitr.html

Deutscher Wetterdienst (2018). *ICON (Icosahedral Nonhydrostatic) Model* [online].

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

Dvořák, P (2008). *Počasí takřka populárně*. Svět křidel

ECMWF (2012). Describing ECMWF'S forecasts and forecasting system. *Newsletter No. 133*.

ECMWF. (2017, 24. listopad). *ECMWF 25 YEARS OF ENSEMBLE PREDICTION* [videosoubor].

Dostupné z https://www.youtube.com/watch?time_continue=257&v=NLhRUun2iso

ECMWF (2018a). *Fact sheet: Ensemble weather forecasting* [online].

Dostupné z <https://www.ecmwf.int/en/about/media-centre/fact-sheet-ensemble-weather-forecasting>

ECMWF (2018b). *Global forecasts* [online]. Dostupné z <https://www.ecmwf.int/en/about/what-we-do/global-forecasts>

ECMWF (2018c). *High resolution mean sea level pressure and ensemble spread* [online].

Dostupné z https://www.ecmwf.int/en/forecasts/charts/catalogue/medium/medium-mslp-spread?facets=undefined&time=2018042512,96,2018042912&projection=classical_global

ECMWF (2018d). *Medium-range forecasts* [online].

Dostupné z <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/charts/product-descriptions/Medium-range%20forecasts>

ECMWF (2018e). *Modelling and Prediction* [online].

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

ESA (2018). *Metop second generation* [online].

Dostupné z http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2012/11/MetOp_Second_Generation

EUMETSAT. (2012, 28. únor). *EUMETSAT Ground System* [videosoubor].

Dostupné z https://www.youtube.com/watch?time_continue=251&v=k4_IoGL1xRk

EUMETSAT (2018a). *What We Do* [online].

Dostupné z <https://www.eumetsat.int/website/home/AboutUs/WhatWeDo/index.html>

EUMETSAT (2018b). *Operating Satellites* [online].

Dostupné z <https://www.eumetsat.int/website/home/AboutUs/WhatWeDo/OperatingSatellites/index.html>

EUMETSAT (2018c). *Satellites* [online].

Dostupné z <https://www.eumetsat.int/website/home/Satellites/index.html>

In-počasí (2018). *Numerický model – nápověda* [online].

Dostupné z <https://www.in-pocasi.cz/model/napoveda/>

Klara (2018). *Předpovědi portálu Klara* [online]. Dostupné dne 02.08.2018 z mobilní aplikace Klara.

Kobzová, E. (1998). *Počasí*. Olomouc: Rubico

Max-Planck-Institut für Meteorologie (2018a). *ICON-ESM* [online].

Dostupné z <https://www.mpimet.mpg.de/en/science/models/icon-esm/>

Max-Planck-Institut für Meteorologie (2018b). *ICON-ESM – MPI-M's next-generation Earth system model* [online]. Dostupné z <https://www.mpimet.mpg.de/en/communication/news/focus-on-overview/icon-earth-system-model/>

Meteoblue (2018a). *Počasí Letiště Václava Havla Praha* [online]. Dostupné dne 23.03.2018 z https://www.meteoblue.com/cs/po%C4%8Das%C3%AD/p%C5%99edpov%C4%9B%C4%8F/t%C3%BDden/leti%C5%A1t%C4%9B-v%C3%A1clava-havla-praha_%C4%8Cesko_6299654

Meteoblue (2018b). *Počasí Letiště Václava Havla Praha* [online]. Dostupné dne 28.6.2018 z https://www.meteoblue.com/cs/po%C4%8Das%C3%AD/p%C5%99edpov%C4%9B%C4%8F/t%C3%BDden/leti%C5%A1t%C4%9B-v%C3%A1clava-havla-praha_%C4%8Cesko_6299654

Meteoblue (2018c). *Weather Modelling (NMM)* [online].

Dostupné z <https://content.meteoblue.com/tr/research-development/data-sources/weather-modelling>

Meteorologisk institutt (2018). *About the Norwegian Meteorological Institute* [online].

Dostupné z <https://www.met.no/en/About-us/About-MET-Norway>

NOAA (2016). *The Global Forecast System (GFS) – Global Spectral Model (GSM)* [online].

Dostupné z <http://www.emc.ncep.noaa.gov/GFS/doc.php>

NOAA (2018a). *Global Data Assimilation System (GDAS)* [online].

Dostupné z <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-data-assimilation-system-gdas>

NOAA (2018b). *Global Forecast System* [online]. Dostupné z <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>

NOAA (2018c). *NOAA Environmental Modeling System* [online].

Dostupné z <http://www.emc.ncep.noaa.gov/index.php?branch=NEMS>

NOAA (2018d). *The NOAA Environmental Modeling System* [online].
Dostupné z <https://vlab.ncep.noaa.gov/web/environmental-modeling-center/nems1>

Šálek (2013). *Monitoring a předpověď počasí* [online].
Dostupné z https://is.muni.cz/el/1431/podzim2013/Z0076/um/Monitoring_a_predpoved_pocasi__dr._Salek.pdf

Třípól (2014, 30. červen). *Aladin* [online].
Dostupné z <https://www.3pol.cz/cz/rubriky/rozhovory/1271-aladin>

Vysoudil, M. (2004). *Meteorologie a klimatologie*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci

Yr (2018a). *Information about Yr* [online]. Dostupné z <http://om.yr.no/about>

Yr (2018b). *Předpovědi modelu Yr.no* [online]. Dostupné dne 04.07.2018 z mobilní aplikace Yr.

WeatherCast (2018). *Ensemble forecast* [online].
Dostupné z <http://www.weathercast.co.uk/services/ensemble-forecast.html>

WeatherOnline (2018). *Srážky GFS Model* [online].
Dostupné z <https://www.weatheronline.cz/cgi-bin/expertcharts?MODELL=gfs&MODELLTYP=1&VAR=prec&INFO=1>

Wetterzentrale (2018). *Top Karten: GFS* [online].
Dostupné dne 05.06.2018 z <http://www.wetterzentrale.de/en/topkarten.php?map=1&model=gfs&var=4&time=3&run=0&lid=OP&h=0&mv=0&tr=3>

Seznam obrázků

Obrázek 1: Předpovědní synoptická mapa pro Evropu	14
Obrázek 2: Meteorologická družice Metop druhé generace	22
Obrázek 3: Mapy krátkodobých předpovědí srážek a oblačnosti modelu Aladin	28
Obrázek 4: Diagram hlavní součásti NEMS včetně fyzických komponent	31
Obrázek 5: Meteorologické satelity aktuálně využívané společností EUMETSAT	33
Obrázek 6: Předpověď větru typu „ensemble“ pro Stockholm	38
Obrázek 7: 24hodinová předpověď srážek nad Evropou podle modelu GFS	39
Obrázek 8: Výstup systému GDAS znázorňující množství vody ve sněhu pokrývající zemi	41
Obrázek 9: Schematické zobrazení struktury mřížky dvacetistěnu a příklad mřížky s vylepšenou oblastí v Evropě	42
Obrázek 10: Schéma propojení komponentů v systému ICON-ESM.....	44
Obrázek 11: Typická konfigurace mřížky ICON-A a ICON-O, které jsou spojeny do výstupu ICON-ESM.....	45
Obrázek 13: Ukázka dostupné 24hodinové předpovědi modelu Aladin pro Ruzyni	51
Obrázek 14: Ukázka dostupné 24hodinové předpovědi modelu Meteoblue bez publikované vlhkosti vzduchu	52
Obrázek 15: Ukázka dostupné 24hodinové předpovědi modelu Meteoblue s publikovanou vlhkostí vzduchu	53
Obrázek 16: Ukázka dostupné 24hodinové předpovědi modelu Yr	54
Obrázek 17: Ukázka dostupné 24hodinové předpovědi modelů ECMWF, GFS a ICON	56
Obrázek 18: Ukázka dostupné 24hodinové předpovědi pokrytí oblačnosti modelů ECMWF, GFS a ICON	57
Obrázek 19: Ukázka dostupné 24hodinové předpovědi vlhkosti vzduchu modelů ECMWF, GFS a ICON	57
Obrázek 20: Ukázka dostupné 24hodinové předpovědi atmosférického tlaku modelu GFS	58
Obrázek 21: Ukázka dostupné 24hodinové předpovědi portálu Klara	59
Obrázek 22: Ukázka dostupné meteorologické zprávy o aktuálním počasí na území Praha-Ruzyně	61
Obrázek 25: Grafy vzájemných korelací mezi modely pro teplotu a pokrytí oblačnosti (program PAST).....	70
Obrázek 26: Grafy vzájemných korelací mezi modely pro úhrn srážek a rychlost větru (program PAST).....	70
Obrázek 27: Grafy vzájemných korelací mezi modely pro vlhkost vzduchu a atmosférický tlak (program PAST).....	71
Obrázek 28: Graf vzájemné korelace mezi modely pro rosný bod (program PAST).....	71

Seznam tabulek

Tabulka 1: Výsledky testu středních hodnot.....	65
Tabulka 2: Střední hodnoty veškerých veličin každého z modelů.....	66
Tabulka 3: Výsledky testu shody rozptylů	67
Tabulka 4: Hodnoty rozptylů každého z modelů pro veličiny, u kterých byla vyvrácena shoda rozptylů	68
Tabulka 5: Výsledky testu lineární nezávislosti pro teplotu.....	74
Tabulka 6: Výsledky testu lineární nezávislosti pro pokrytí oblačnosti	75
Tabulka 7: Výsledky testu lineární nezávislosti pro úhrn srážek.....	76
Tabulka 8: Výsledky testu lineární nezávislosti pro rychlost větru	76
Tabulka 9: Výsledky testu lineární nezávislosti pro vlhkost vzduchu	76
Tabulka 10: Výsledky testu lineární nezávislosti pro atmosférický tlak	77
Tabulka 11: Výsledky testu lineární nezávislosti pro rosný bod.....	78
Tabulka 12: Porovnání procentuální úspěšnosti modelů v předpovídání směru větru	79
Tabulka 13: Přehled výrazně lepších a horších předpovědí pro jednotlivé atmosférické prvky podle středních hodnot	80
Tabulka 14: Přehled výrazně lepších a horších předpovědí pro jednotlivé atmosférické prvky podle rozptylů	81

Seznam příloh

Příloha 1: Ukázka záznamu předpovědí a nastalých skutečností v programu MS Excel	91
Příloha 2: Ukázka výpočtů odchylek předpovědí od nastalých skutečností v programu MS Excel	91
Příloha 3: Ukázka importovaných dat o teplotě do programu PAST	92
Příloha 4: Ukázka výsledků dvoucestné ANOVY pro atmosférický tlak na výstupu programu PAST	93
Příloha 5: Ukázka výsledků Leveneova testu pro pokrytí oblačnosti na výstupu programu PAST	93
Příloha 6: Ukázka souhrnné statistiky úhrnu srážek na výstupu programu PAST.....	94
Příloha 7: Ukázka aplikace a výsledku Pearsonova testu nezávislosti pro rychlost větru mezi modely Yr a ECMWF v programu Scilab.....	94

Příloha 1: Ukázka záznamu předpovědí a nastalých skutečností v programu MS Excel

Předpovědní model	teplota (°C)	pokrytí oblačnosti (počet osmin)	úhrn srážek (mm/hod)	rychlost větru (m/s)	směr větru (světová strana)	relativní vlhkost (%)	atmosférický tlak (hPa)	rosný bod (°C)
24.05.2018, 15:00								
Aladin	23	8	0	6,3	V	63,9	1018,9	-
Klara	21,5	8	0	5,6	V	57	1019,1	12,8
Meteoblue	22	7	0,5	4,5	V	55	-	-
Yr	21,2	8	0,2	5,8	V	-	1019	-
Windy ICON	22	8	0,9	5	V	69	1018	14
Windy ECMWF	24	5	0,8	6	V	51	1018	12
Windy GFS	22	5	1,6	7	V	73	1019	16
Nastalá skutečnost	22,3	7	0	6	V	59	1017,2	13,9
25.05.2018, 12:00								
Aladin	17,2	8	0	3,3	JZ	81,8	1020,8	-
Klara	22,2	6	0	4,7	V	40	1018,7	7,9
Meteoblue	21	7	0	3,9	V	47	-	-
Yr	21,9	7	0	4,6	V	-	1019	-
Windy ICON	22	1	0	3	SV	42	1018	10
Windy ECMWF	21	4	0	4,5	V	32	1018	9
Windy GFS	20	3	0	4	V	54	1019	12
Nastalá skutečnost	20,5	5	0	2	JV	52	1019,1	10,3

Příloha 2: Ukázka výpočtů odchylek předpovědí od nastalých skutečností v programu MS Excel

Předpovědní model	teplota (°C)	pokrytí oblačnosti (počet osmin)	úhrn srážek (mm/hod)	rychlost větru (m/s)	směr větru (světová strana)	vlhkost (%)	tlak (hPa)	rosný bod (°C)
05.07.2018, 21:00								
Aladin	0,8	1	0	1,8	správně	12,9	2,2	neměřeno
Klara	2,8	0	0	1,7	špatně	11	0	0,2
Meteoblue	0,2	1	0	0,5	špatně	3	neměřeno	neměřeno
Yr	2,4	1	0	1,5	správně	neměřeno	0,4	neměřeno
Windy ICON	2,8	5	0,2	0,5	špatně	7	0,6	0,9
Windy ECMWF	4,8	4	0	2,5	správně	7	0,4	0,9
Windy GFS	1,8	2	0	0,5	špatně	7	0,4	2,1
06.07.2018, 09:00								
Aladin	5	0	4	1,1	špatně	25	0,7	neměřeno
Klara	5,3	1	4	0,1	špatně	34	0,9	2,4
Meteoblue	1,5	1	4	0,2	špatně	3	neměřeno	neměřeno
Yr	5,1	0	4	0,2	špatně	neměřeno	1,2	neměřeno
Windy ICON	4,5	2	4	0,5	správně	26	0,2	1,3
Windy ECMWF	4,5	3	3,8	0	špatně	28	1,2	2,3
Windy GFS	0,5	2	2,9	0,5	správně	2	0,2	1,7

Příloha 3: Ukázka importovaných dat o teplotě do programu PAST

01Teploty.dat

	Aladin	Klara	Meteoblue	Yr	ICON	ECMWF	GFS	H	I
1	• 3,9	3,5	2,1	3,1	2,1	5,1	3,1		
2	• 0,1	2,1	2,1	1,1	3,1	2,1	0,1		
3	• 1,7	1	0,8	1	0,8	1,2	1,2		
4	• 1,7	0,2	0,5	0,3	0,5	0,5	0,5		
5	• 0,5	2,2	0,8	1,8	1,2	1,8	2,8		
6	• 0	0,9	1,3	0,3	0,3	0,3	3,3		
7	• 1	2,1	1	2	2	3	1		
8	• 0,4	0,5	0,6	0,6	0,4	3,6	1,4		
9	• 3,9	2,4	1,2	2	2,2	2,2	3,2		
10	• 0,4	0,4	1,4	0,6	2,4	0,6	1,4		
11	• 5,4	4,1	2,8	3,4	1,8	0,8	3,8		
12	• 0,7	0,8	1,7	1,2	0,7	1,7	1,3		
13	• 0,2	0,6	0,6	1,4	0,6	1,4	1,6		
14	• 1,2	1,6	0,1	2,8	0,1	1,1	0,9		
15	• 1,5	1,8	3,5	2,8	3,5	2,5	2,5		
16	• 2,7	0	1,1	0,3	2,1	2,1	0,9		
17	• 1,1	0,4	1	0	2	2	1		
18	• 6,3	0,6	0,9	0,6	0,1	0,9	1,1		
19	• 0,1	0,6	1,9	1,8	1,9	2,9	1,9		
20	• 1	0,1	0,8	1,4	0,8	0,2	1,8		
21	• 1,3	0,1	1	1	2	2	2		
22	• 1,3	1	0,3	0,3	1,3	2,7	2,3		
23	• 0,1	0,2	1,1	0,8	0,9	1,1	0,1		
24	• 0,3	0,1	1	0	0	1	1		
25	• 2,1	1,1	0,3	0,7	0,7	1,3	0,7		
26	• 0	0,5	1,1	0,2	0,9	1,1	2,1		

Příloha 4: Ukázka výsledků dvoucestné ANOVY pro atmosférický tlak na výstupu programu PAST

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Rows:	114,758	89	1,28942	1,581	0,001515
Columns:	12,4111	5	2,48221	3,044	0,01029
Error:	362,861	445	0,815417		
Total:	490,03	539			

Příloha 5: Ukázka výsledků Leveneova testu pro pokrytí oblačnosti na výstupu programu PAST

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	62,3111	6	10,3852	3,237	0,003862
Within groups:	1998,89	623	3,20849		Permutation p (n=99999)
Total:	2061,2	629			0,00371

Components of variance (only for random effects):

Var(group):	0,0797411	Var(error):	3,20849	ICC:	0,0242504
-------------	-----------	-------------	---------	------	-----------

ω^2 : 0,02086

Levene's test for homogeneity of variance, from means	p (same):	0,2158
Levene's test, from medians	p (same):	0,4531

Příloha 6: Ukázka souhrnné statistiky úhrnu srážek na výstupu programu PAST

Univariate statistics

	Aladin	Klara	Meteoblue	Yr	ICON	ECMWF	GFS
N	90	90	90	90	90	90	90
Min	0	0	0	0	0	0	0
Max	6,4	6	7,4	5,8	7	6,5	7
Sum	115,6	109,2	147,7	105,6	119,4	113,5	108,8
Mean	1,284444	1,213333	1,641111	1,173333	1,326667	1,261111	1,208889
Std. error	0,1298699	0,117848	0,1594928	0,1197772	0,1231383	0,1272066	0,1249783
Variance	1,517958	1,249933	2,289414	1,291191	1,364674	1,456336	1,405763
Stand. dev	1,232054	1,118004	1,513081	1,136306	1,168193	1,206787	1,185649
Median	0,9	0,9	1,35	0,9	1	1	1
25 prcnil	0,475	0,375	0,5	0,3	0,5	0,5	0,5
75 prcnil	1,7	1,7	2,225	1,8	2	1,625	1,5
Skewness	2,129536	1,741785	1,703954	1,643236	1,738543	1,796398	2,066743
Kurtosis	5,866322	4,056535	3,25995	3,538308	5,381816	4,603812	6,029356
Geom. mean	0	0	0	0	0	0	0
Coeff. var	95,92117	92,14317	92,19858	96,84425	88,05473	95,69239	98,07756

Příloha 7: Ukázka aplikace a výsledku Pearsonova testu nezávislosti pro rychlost větru mezi modely Yr a ECMWF v programu Scilab

```

--> [p,T,z]=pearson_test([A],[B],0.05)
Warning : redefining function: cov

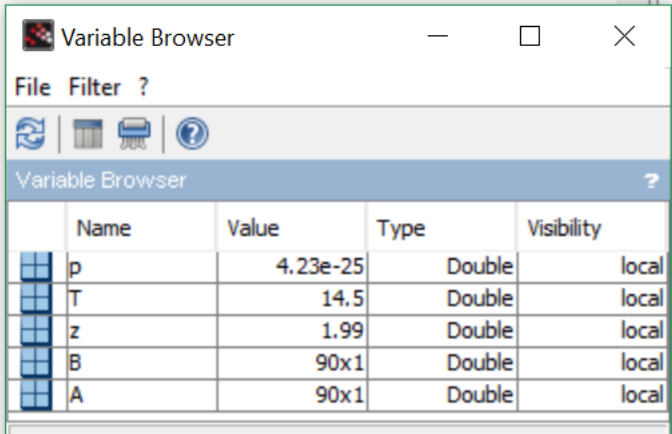
z =

    1.9872899
T =

    14.527565
p =

    4.233D-25
-->

```



Name	Value	Type	Visibility
p	4.23e-25	Double	local
T	14.5	Double	local
z	1.99	Double	local
B	90x1	Double	local
A	90x1	Double	local