

Evaluace vybraných numerických modelů počasí pro určení GNSS troposférických korekcí

Jan Douša, Pavel Václavovic, Michal Eliaš, Lewen Zhao

Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický, v.v.i.

29. 1. 2019

Obsah

1	Úvod	4
2	Troposférické zpoždění GNSS signálu	4
2.1	Definice troposférických parametrů.....	4
2.2	Použití přímo měřených meteorologických parametrů.....	5
2.3	Použití klimatických (blind) modelů	5
2.3.1	MOPS model.....	7
2.3.2	GPT2w model	7
2.4	Použití numerických modelů počasí.....	7
2.4.1	Regionální model ALADIN	8
2.4.2	Regionální model WRF.....	9
2.4.3	Globální model ERA-Interim.....	9
2.4.4	Globální model GFS.....	9
3	Metoda vyhodnocení troposférických modelů	10
3.1	Výběr oblasti, stanic a periody hodnocení.....	10
3.2	Postup vyhodnocení	11
3.3	Referenční produkt ZTD.....	13
4	Vyhodnocení troposférických produktů.....	14
4.1	Celkové zhodnocení externích zdrojů.....	14
4.2	Zhodnocení ZTD z numerických modelů počasí	16
4.2.1	Regionální model ALADIN	16
4.2.1	Regionální model WRF.....	17
4.2.2	Globální model ERA-Interim.....	18
4.2.3	Globální model GFS.....	19
4.3	Zhodnocení klimatických modelů.....	21
4.3.1	RTCA MOPS model.....	21
4.3.2	GPT2w model	22
5	Závěr.....	23
5.1	Shrnutí výsledků evaluace	23
5.2	Doporučení vhodného modelu	24
	Příloha: Souřadnice použitých stanic v analýze.....	28

Seznam použitých zkratk

ALA	Regionální numerický model počasí Aladin
D01	Značení regionálního numerického modelu počasí WRF
DOY	Day of Year – den v roku
ECWMF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ERA	Globální numerický model počasí ERA-Interim
GLONASS	Globalnaja navigacionnaja sputnikovaja sistema
GNSS	Global Navigate Satellite System
GOP	Geodetic Observatory Pecny
GPS	Global Positioning System
GPT2w	Global Pressure and Temperature model (Version 2, wet)
GRxx	GNSS produkt (GPS+GLONASS)
Gxxx	GNSS produkt (GPS)
ICS	Institute of Computer Science
IGS	International GNSS Service
MOPS	Minimum Observation Performance Standards
NMP	Numerický model počasí
PPP	Precise Point Positioning
RTCA	The Radio Transmission Commission for Aeronautics
WRF	Weather Research and Forecasting model
ZHD	Zenith Hydrostatic Delay – hydrostatická složka troposférického zpoždění
ZTD	Zenith Total Delay – troposférické zpoždění
ZWD	Zenith Wet Delay – mokrá složka troposférického zpoždění

1 Úvod

Dokument popisuje metody a výsledné charakteristiky zhodnocení externích troposférických korekcí pro potřeby GNSS. Externí troposférické zdroje korekcí představují data z vybraných meteorologických numerických modelů počasí (NMP) a z modelů založených na tabulkových klimatických datech (tzv. blind modelů). Vyhodnocení je provedeno pro období měsíce května 2018 a na vybrané sadě permanentních referenčních GNSS stanic.

Členění dokumentu je následující: V druhé kapitole stručně definujeme parametry z troposférických korekcí, které jsou generovány na základě dat z různých zdrojů, a popisujeme modely vybrané pro vyhodnocení kvality a vhodnosti použití. V třetí části jsou popsány vybrané numerické modely počasí. V další části je popsána metoda vyhodnocení, volba časového a prostorového rozsahu pro zhodnocení. Je stručně popsán referenční zdroj dat, který je použit k evaluaci dat z externích zdrojů. Následuje vyhodnocení výsledků odhadnutých korekcí troposférického zpoždění získané z externích modelů, a to jak z prostorového tak i z časového hlediska. Poslední kapitola obsahuje shrnutí celé evaluace a doporučení potřebná k rozhodnutí ohledně volby nejvhodnějšího NMP pro přípravu troposférických korekcí.

2 Troposférické zpoždění GNSS signálu

Tato kapitola obsahuje seznam definic parametrů troposférického zpoždění pro GNSS. Vedle toho jsou zde stručně popsány charakteristiky tzv. blind modelů, konkrétně RTCA MOPS a GPT2w modelů.

2.1 Definice troposférických parametrů

Obsahem dokumentu je zhodnocení korekce z celkového troposférického zpoždění, který je obecně definován jako součet dvou atmosférických vlivů

$$ZTD = ZHD + ZWD \quad (1)$$

Parametr ZHD [m] zde reprezentuje suchou složku celkového zpoždění charakteristickou při znalosti atmosférického tlaku. Na druhou stranu ZWD [m] reprezentuje mokrou složku zpoždění, která je ovlivněna obsahem vodních par v troposféře. V GNSS je tato druhá část určována jako neznámý parametr, přičemž nejčastěji reprezentuje víceméně doplněk k hydrostatické složce, která je použita jako apriorní hodnota.

Teoretické odvození těchto parametrů obsahuje dokument „Metodika tvorby troposférického modelu s využitím dat z numerického modelu počasí a troposférických parametrů GNSS“. Pro připomenutí, pro hydrostatickou tak i pro mokrou složku zpoždění v zenitu nad stanicí platí vztahy

$$ZHD = 10^{-6} k_1 \frac{R}{M_h} \int_{h_0}^{\infty} \rho(z) dz \approx \frac{0.0022767 p}{1 - 0.00266 \cos(2\varphi) - 0.00028 h} \quad (2)$$

$$ZWD = 10^{-6} \left(k_2 - \frac{M_w}{M_h} + \frac{k_3}{T_m} \right) \int_{h_0}^{\infty} \frac{e}{T} dz \quad (3)$$

kde M_i [kg mol^{-1}] je molární hmotnost, R [$\text{J K}^{-1} \text{mol}^{-1}$] je specifická plynová konstanta, ρ [kg/m^3] je hustota atmosféry, z [gpm] je geopotenciální výška, P [hPa] je atmosférický tlak, e [hPa] je parciální tlak vodních par, T [K] je teplota, T_m [K] je střední teplota, h [km] je nadmořská výška a φ je zeměpisná šířka, k_1 , k_2 a k_3 jsou vhodně zvolené empirické konstanty (koeficienty refrakce).

2.2 Použití přímo měřených meteorologických parametrů

Z předchozích vztahů je patrné, že k odvození základních parametrů ZHD a ZWD potřebujeme znát nebo odhadnout aktuální hodnoty vybraných meteorologických parametrů. Jsou to atmosférický tlak, který se vyskytuje v modelu ZHD a parametry tlaku vodních par, teploty a střední teploty, na kterých závisí model ZWD.

Atmosférický tlak lze z dlouhodobého i prostorového hlediska charakterizovat jako relativně stabilní veličinu, kterou lze v rámci řešení NMP celkem dobře modelovat i předpovídat. Podle vztahu pro odvození korekce ZHD, kde vystupuje hodnota atmosférického tlaku v místě observací GNSS (a které nejčastěji probíhá na povrchu Země) lze tento parametr s dostatečnou přesností odvodit jak z numerického modelu počasí, tak je i možné použít přímo měřenou hodnotu v místě uživatele. V druhém případě je ale významnou podmínkou absolutní přesnosti měření tlaku (<1 hPa), jež vyžaduje kvalitní a pravidelně kalibrovaný tlakoměr.

Pro odvození korekce pro vlhkou složku troposférického zpoždění potřebujeme znát teplotu a tlak vodních par jako funkci výšky ve vertikálním profilu nad přijímačem GNSS. Pro tento účel využijeme k odvození hodnot těchto parametrů vhodné aproximace vertikálních profilů, optimálně z NMP dat.

2.3 Použití klimatických (blind) modelů

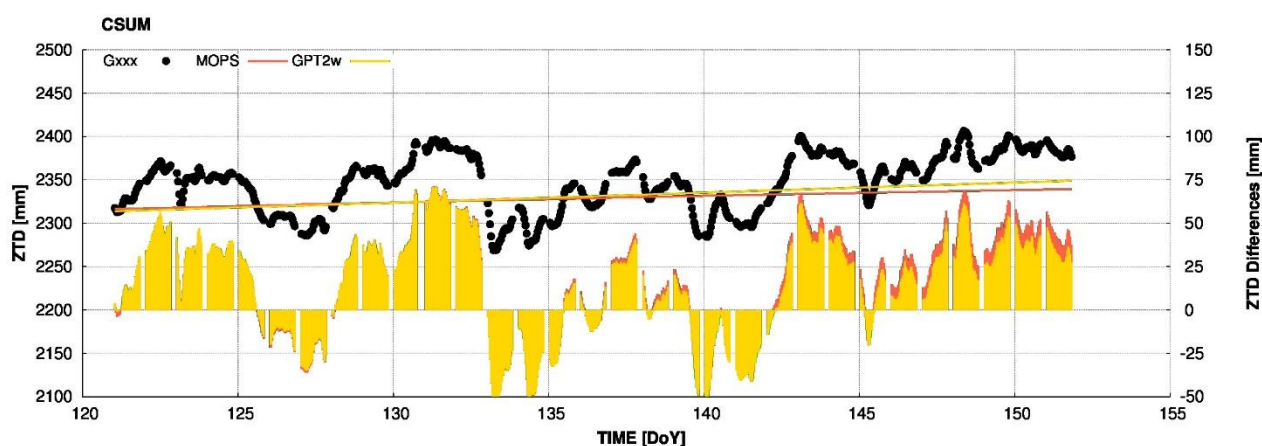
Blind modely jsou v současné době využívány pro potřeby odvození korekcí z troposférického zpoždění GNSS signálu vybraných aplikací především z důvodu jejich praktického použití. Díky použití klimatických hodnot, či hodnot určených z dlouhodobé aproximace meteorologických parametrů, je možné všechna vstupní data a potřebné algoritmy uložit přímo do uživatelského programového vybavení. K odhadu troposférických korekcí nejsou třeba žádné další informace o aktuálním stavu atmosféry a není tak potřebný přístup k externím meteorologickým datům. Z výše uvedeného ovšem jasně vyplývá také zásadní omezení klimatických modelů – jejich přesnost vzhledem k časově extrapolovaným vstupním parametrům, které v daném místě a čase mohou pouze nepřesně charakterizovat aktuální stav atmosféry (troposféry).

Základním klimatickým modelem je RTCA MOPS model (Collins 1999). Pro zvýšení přesnosti byly postupně vytvořena řada dalších modelů. Seznam současných blind modelů společně s odkazem na jejich reference jsou uvedeny v tabulce 1. K evaluaci troposférických parametrů jsme pro názornost

použili kromě MOPS modelu také GPT2w model (Böhm et al. 2015), který v současné době reprezentuje jeden z nejpřesnějších blind modelů, a který je i rozšířen v geodetické komunitě.

Tabulkové hodnoty jsou zpravidla získány na základě zpracování dlouhodobých klimatologických časových řad vybraných parametrů, především tlaku, teploty a parciálního tlaku vodních par. Princip zpracování je takový, že na základě vybraného harmonického modelu se odhadnou hodnoty ročních, půlročních anebo jiných amplitud a jejich případné fázové posuvy. Takto odhadnuté informace pak tvoří základ klimatických modelů.

Obrázek 1 obsahuje příklad průběhu vybraných modelů (MOPS a GPT2W stručně popsány níže) na vybrané GNSS permanentní stanici - CSUM. Body černé barvy reprezentují referenční ZTD hodnoty odvozené pro tuto stanici z analýzy GNSS dat (viz kapitola 3.2). V dolní části obsahuje obrázek také rozdíly mezi hodnotami ZTD z obou modelů vůči referenčním hodnotám. Na tomto příkladu je zřejmé, že aproximace pomocí klimatických modelů vykazuje v krátkém období víceméně lineární aproximaci a nemůže zachytit variabilitu atmosférických vlivů. Je to způsobeno jednak malým časovým rozsahem prezentovaných dat a jednak tím, že aproximace je limitována volbou harmonického modelu. Diference mezi dvěma vybranými modely na stanici CSUM v průběhu května 2018 vykazují rozptýl v intervalu $\pm 4,0$ cm a nezanedbatelnou systematickou chybu (též v řádu cm). Tato situace odpovídá přesnosti těchto modelů získaných v rámci různých studií, viz Tabulka 1.



Obrázek 1: Průběh referenčních ZTD (černé tečky) a dvou vybraných klimatických modelů. Rozdíly mezi modely lze charakterizovat v intervalu ± 4.0 cm, přičemž vykazují systematickou chybu též v řádu cm.

Tabulka 1: Přehled klimatických modelů a jejich odhadované přesnosti

Model	BIAS (cm)	RMSE (cm)	Reference
RTCA-MOPS	-2,5	4,55	SC-159 (2006)
ESA GalTropo	+0,8	3,82	Martellucci (2012)
IGG Trop	-0,8	4,00	Li et al. (2012)
GPT2	-2,8	3,79	Lagler et al. (2013)
TropGrid2	-0,3	3,78	Schueler (2014)
GPT2w	-0,2	3,61	Boehm et al. (2015)
GOPE	-0,4	3,60	Douša et al. (2015)
GZTD	-0,3	3,90	Yao et al. (2016)

2.3.1 MOPS model

RTCA (The Radio Transmission Commission for Aeronautics) definoval MOPS (*Minimum Operation Performance Standards*) model pro GNSS a je zejména pro účely navigace v rámci systémů SBAS (Space-Based Augmentation System).

V rámci tohoto standardu jsou složky pro hydrostatickou a mokrou korekci definovány rovnicemi (2) a (3). MOPS model je založen na množině tabulkových hodnot pěti meteorologických parametrů (atmosférický tlak, teplota, parciální tlak vodních par, gradientu teploty a poklesu vodních par), charakterizující pouze pět pásem zeměpisné šířky (15°, 30°, 45°, 60° a 75°). Tabulky uvádějí jak průměrné hodnoty těchto parametrů tak také pro jejich amplitudy. Potřebné meteorologické hodnoty jsou pak v rámci modelu definovány jako funkce zeměpisné šířky a dne roku, ale nemění se v závislosti na zeměpisné délce. Průměrné hodnoty meteorologických parametrů a jejich roční amplitudy jsou odvozené z modelu U.S. Standardní Atmosféry (1966). Odhadovaná systematická chyba RTCA MOPS modelu je -2,5 cm a odhadovaná směrodatná odchylka modelu je 4,6 cm.

2.3.2 GPT2w model

GPT2w, *Global Pressure and Temperature, Verze 2* (Böhm et al. 2015) je nejnovější z řady empirických modelů vyvinutých na Technické Univerzitě ve Vídni (TUW), který poskytuje jak roční, tak i půlroční amplitudy atmosférického tlaku, teploty, vlhkosti, a dodatečných parametrů, např. teplotního gradientu, parametru poklesu vodních par a střední teploty.

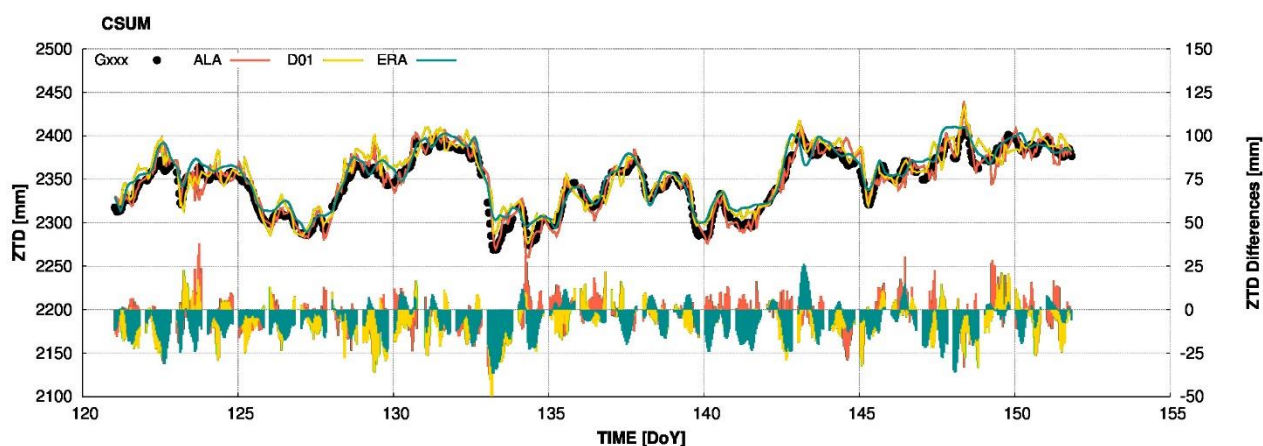
Meteorologické parametry jsou odvozeny na základě zpracování dat z numerického modelu počasí ERA-Interim při horizontálním rozlišení 1° v zeměpisné šířce i v zeměpisné délce. Globální průměrná systematická chyba korekce ZTD je přibližně 0,1 cm a směrodatná odchylka je přibližně 3,6 cm. Odvození přesností bylo založeno na analýze hodnot tohoto parametru s GNSS ZTD hodnotami poskytnuté Mezinárodní GNSS službou (IGS, <http://www.igs.org>).

2.4 Použití numerických modelů počasí

Numerický model počasí (NMP) reprezentuje časově proměnné trojdimenzionální pole fyzikálních veličin potřebných pro rekonstrukci vlivu zpoždění z hydrostatické i vlhké složky troposféry. Při jejich dostupnosti jsme schopni pro daný čas a místo vypočítat aktuální parametry korekcí troposférického zpoždění s přesností, která odpovídá přesnosti danému numerickému modelu. Tato část stručně popisuje základní charakteristiky vybraných numerických modelů počasí, použitelných pro určování troposférických korekcí na území ČR, konkrétně

- Regionální model ALADIN
- Regionální model WRF D01
- Globální model ERA-Interim
- Globální model GFS

Obrázek 2 zobrazuje průběhy ZTD korekcí odvozených z numerických modelů pro permanentní stanici CSUM. V dolní části je znázorněn průběh rozdílů těchto ZTD hodnot s referenčními hodnotami (značené černými tečkami). Z průběhu výsledků plyne, že troposférické korekce z NMP vystihují vliv troposféry cca 2-3 krát přesněji než je tomu v případě aproximace pomocí hodnot odvozených z klimatických modelů. Mírně vyšší difference můžeme vidět v případě použití modelu ERA-Interim, což by odpovídalo menšímu prostorovému rozlišení modelu. Rozdíly pro stanici CSUM v květnu 2018 lze charakterizovat v rámci intervalu $\pm 2,5$ cm při existenci systematické chyby do cca 5 mm.



Obrázek 2: Průběh referenčního ZTD (černé tečky) a hodnot ZTD odvozených ze tří numerických modelů počasí. Rozdíly lze charakterizovat v intervalu $\pm 2,5$ cm se systematickou chybou do 5 mm.

2.4.1 Regionální model ALADIN

Regionální 3D numerický model počasí ALADIN je produktem Českého hydrometeorologického úřadu (ČHMÚ). Obsahuje všechny parametry nutné k odhadu hydrostatické a nehydrostatické složky troposférického zpoždění. Geopotenciální výšky jsou vztaženy k zemskému povrchu, ale modelové hladiny jsou vyjádřeny pomocí hybridních vertikálních souřadnic. Atmosférický tlak v jednotlivých modelových hladinách lze spočítat pomocí dvou sad koeficientů, referenčního tlaku (101,325 hPa) a tlaku definovaného pro nejvyšší úroveň.

Základní charakteristiky ALADIN modelu jsou

- formát: GRIB Verze 1
- horizontální rozlišení: 4.7km x 4.7km
- modelová hladiny: 87
- časy analýzy: 00, 06, 12, 18
- intervaly předpovědi: 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h
- horizontální souřadnice: Lambertova konformní projekce (podle ČHMÚ)

Parametry v modelových vrstvách jsou: tlak [Pa], teplota [K], relativní vlhkost [%], voda v kapalném skupenství [kg/kg], voda v pevném skupenství [kg/kg]. Na povrchu modelové orografie je potřebný parametr hodnoty geopotenciálu [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$].

2.4.2 Regionální model WRF

The Weather Research and Forecasting (WRF) numerický model počasí je regionální model sloužící jak pro potřeby výzkumu atmosféry, tak také pro potřeby predikce počasí. Data, zpracovávaná v aktuálním projektu jsou poskytnutý Ústavem informatiky, Akademie věd České republiky.

Model lze charakterizovat následovně:

- formát: NETCDF Verze 4
- horizontální souřadnice: Lambertova konformní projekci
- regionální pokrytí v doméně EUR9 (horizontální rozlišení gridové sítě 9 × 9 km)
- 38 vertikálních výškových úrovní (nejvyšší úroveň v hladině 50 hPa)
- časy analýzy: 00, 06, 12 a 18 UTC
- intervaly předpovědi: 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h

2.4.3 Globální model ERA-Interim

Globální model ERA-Interim je re-analýza provedená do historie za použití atmosférického modelu Evropského centra pro střednědobé předpovědi počasí (ECMWF). Jedná se homogenní datovou sadu pokrývající období několika posledních dekad, a která je dosud kontinuálně doplňována. Zdarma je dostupná pro vědecké účely s prodlevou cca 2-3 měsíců.

Model lze charakterizovat, Dee et al. (2011):

- formát: GRIB Verze 1
- globální pokrytí: -90° až 90° zeměpisné šířky, 0° - 360° zeměpisné délky
- pravidelná síť bodů na kouli (1° × 1° prostorové rozlišení)
- 60 vertikálních hladin (nejvyšší úroveň ve výšce 0,1 hPa)
- data dostupné v rozsahu roků 1990-2014
- časy analýzy: 00, 06, 12 a 18 UTC

2.4.4 Globální model GFS

Global Forecasting System (GFS) jsou předpovědi počasí Národního střediska pro environmentální předpovědi (NCEP) poskytované Národní službou pro počasí (NWS) v rámci US Národní správy pro oceány a atmosféru (NOAA). Jedná se o operativní analýzy modelu počasí poskytující globální předpovědi k horizontu 3.5 dní. Data z analýz i předpovědí jsou volně a bez omezení k dispozici včetně archívu pokrývajícího období až do roku 2004. Data jsou distribuována s pomocí serveru NOMADS (<http://nomads.ncep.noaa.gov>), který obsahuje odkazy na všechny poskytované modely a různé metody přístupu k datům - FTP vs. HTTP/HTTPS a též interaktivní metodu výběru stahovaných dat pomocí filtrů (např. http://nomads.ncep.noaa.gov/cgi-bin/filter_gfs_1p00.pl). Aktuální data z analýz a data z předpovědí v souborech formátu GRIB a GRIB2 v různém horizontálním rozlišení lze získat na adrese: <http://www.ftp.ncep.noaa.gov/data/ncdf/com/gfs/prod/>, archivní data z analýz včetně krátkodobých (3h/6h) předpovědí jsou potom organizovaná ve struktuře podle roku/měsíce analýzy na adrese: <https://nomads.ncdc.noaa.gov/data/gfsanl>. Zásadní rozdíl při použití tohoto

modelu pro odvození troposférických parametrů spočívá ve výškové reprezentaci parametrů pomocí isobarických (tlakových) hladin, které nereflektují orografii terénu (data jsou modelována a k dispozici i pod terénem).

Model lze charakterizovat:

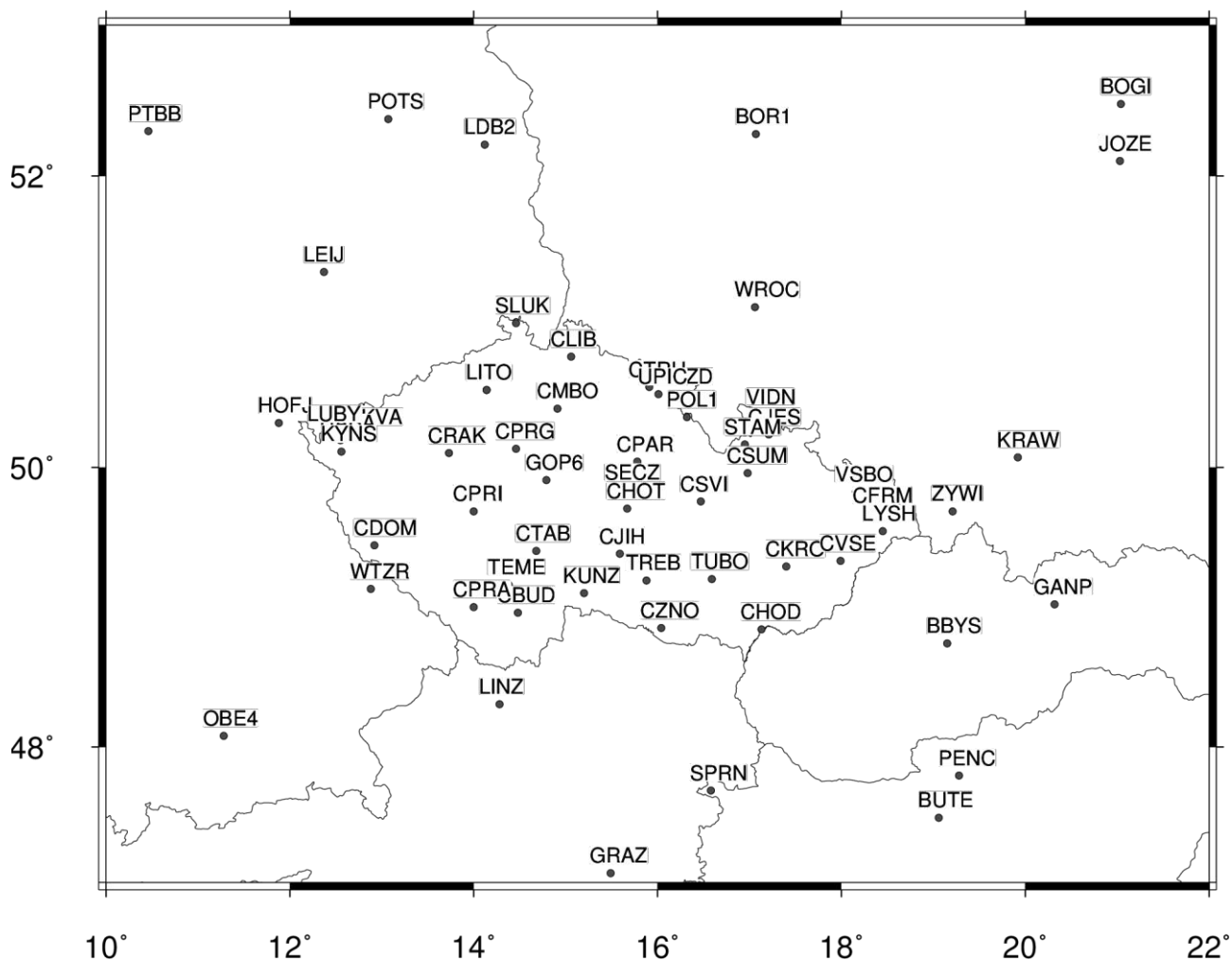
- formát: GRIB Verze 2 (v historii též GRIB Verze 1)
- globální pokrytí: -90° až 90° zeměpisné šířky, 0° - 360° zeměpisné délky
- pravidelná síť bodů na kouli (prostorové rozlišení: $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$, $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$)
- 31 vertikálních (tlakových) hladin
- data dostupná od roku 2004
- časy analýzy: 00, 06, 12 a 18 UTC
- intervaly předpovědi: 03h, 06h (v posledním měsíci až do 84h)

3 Metoda vyhodnocení troposférických modelů

V této kapitole přiblížíme metodu použitou pro vyhodnocení troposférických korekcí z vybraných numerických modelů počasí a doplňkové srovnání dvou modelů klimatických. K evaluaci potřebujeme znát nezávislé a současně nejpřesnější hodnoty parametrů ZHD a ZWD. Bohužel takové k dispozici nemáme. Numerický model navíc maximum dostupných nezávislých a přesných zdrojů dat využívá v asimilaci při zpřesnění modelu pro předpověď počasí. Na druhé straně přesná analýza GNSS dat na vybraných permanentních stanicích může poskytnout vysoce přesné hodnoty ZTD. Tyto jsou zcela nezávislé na NMP a tím se velmi hodí pro naši evaluaci. Jako referenční hodnotu tím ovšem z GNSS získáme pouze ZTD v případě jejich speciálního určení z dostupné sady permanentních GNSS stanic na daném území. Přípravu referenčních ZTD hodnot popíšeme stručně v závěru této kapitoly.

3.1 Výběr oblasti, stanic a periody hodnocení

Statistické zhodnocení jsme prováděli vzhledem k oblasti zájmu, kterou je Česká republika a její nejbližší okolí, za které považovali oblasti cca 400 km za hranicemi. V daném oblasti jsme vyhledali GNSS stanice z dostupných dat permanentních sítí – EUREF, CZEPOS, VESOG a GEONAS. Obrázek 3 ukazuje rozložení stanic v zájmové oblasti. Souřadnice jsou potom uvedeny v Dodatku 1. V evaluaci stanice reprezentují konkrétní body použité pro určení charakteristik hodnocených dat. Data z NWP a Blind modelů jsou proto interpolována do místa vybraných stanic



Obrázek 3: GNSS stanice vybrané pro evaluaci externích zdrojů dat

Protože data ze všech modelů nejsou ve stejném časovém rozlišení, je třeba zvolit vhodný časový interval, s nímž evaluaci provedeme. Vybrali jsme interval 1h, protože dobře charakterizuje očekávané změny v troposféře pro hydrostatickou i vlhkou složku zenitového zpoždění. Data z modelů poskytující nižší rozlišení (BLIND, ERA-Interim a GFS) jsme proto interpolovali pomocí spline funkcí do časového intervalu 1h. Modely WRF a ALADIN bylo možné použít optimálně, tj. v plném rozlišení 1h dostupného z průběžných předpovědí vycházejících z analýzy v intervalu 6h.

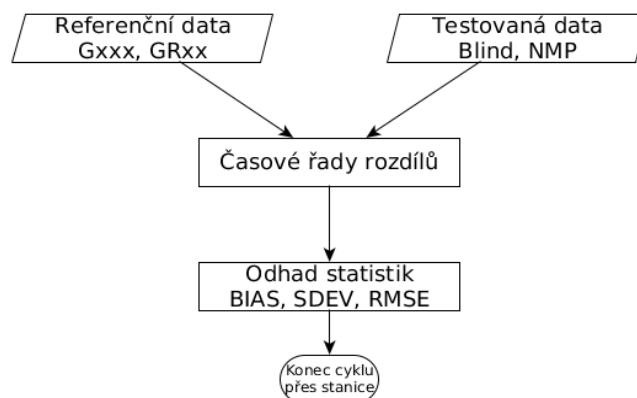
3.2 Postup vyhodnocení

K evaluaci externích zdrojů dat pro výběr jejich využití při odhadu ZTD korekcí jsme navrhli tři způsoby zhodnocení:

- Prostorové
- Časové
- Celkové

Tento přístup nám umožní vhodně zhodnotit jednotlivé zdroje dat z různých pohledů včetně optimálního odhadu statistické charakteristiky a jejich variability v čase i v prostoru. Postup prostorového a celkového zhodnocení obsahuje následující kroky, viz Obrázek 4:

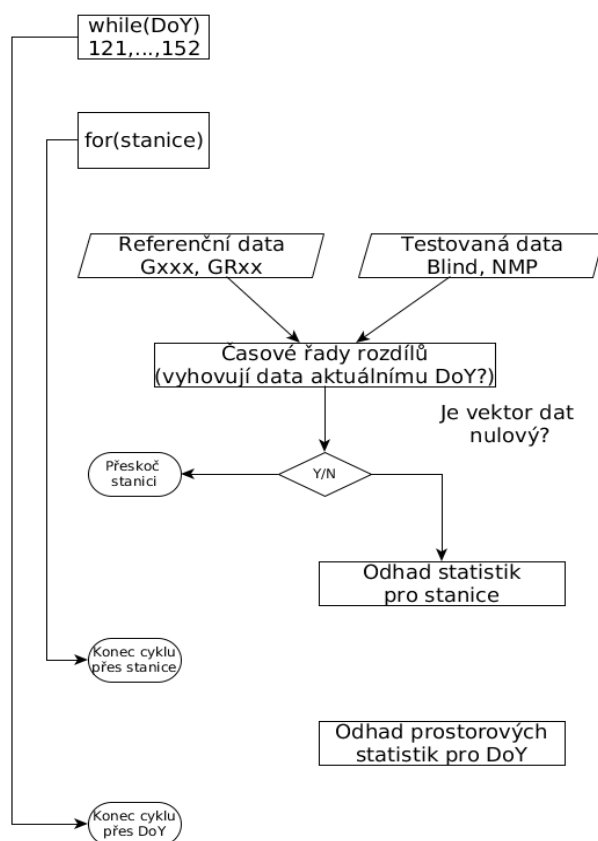
1. Vycházíme z cyklu přes vybrané permanentní stanice.
2. Z referenčního zdroje dat a externího zdroje dat pro aktuální permanentní stanici vyhotovíme časové řady rozdílů ZTD.
3. Pro aktuální stanici odhadneme základní statistiky, konkrétně systematickou chybu (BIAS), směrodatnou odchylku (SDEV), střední kvadratickou odchylku (RMSE).
4. Pokračujeme v určení statistických charakteristik přes všechny vybrané referenční stanice.
5. Po ukončení cyklu přes stanice určíme celkovou statistiky popisující prostorovou i časovou variabilitu odhadnutých korekcí ZTD z externích zdrojů. Charakteristiky každé jednotlivé stanice potom vystihují kvalitu zdroje dat pro případ jednotlivých stanic.



Obrázek 4: Postup prostorového a celkového zhodnocení ZTD a z externích zdrojů dat.

Časové hodnocení externích zdrojů dat vůči referenčním hodnotám sestává z následujících kroků, viz Obrázek 5:

1. Vycházíme z výběru dat přes jednotlivé dni v roce (DoY).
2. Vycházíme z výběru dat přes jednotlivé stanice.
3. Načteme referenční ZTD (GNSS), tak ZTD z externích zdrojů (NMP či Blind model) a určíme časové řady rozdílů ZTD tak, aby vyhovovaly časovému intervalu aktuálního DoY. V rámci tohoto kroku testujeme, zda některý ze zdrojů dat v konkrétním dni není prázdný. Pokud ano, pak výpočet přeručíme a pokračujeme další stanicí.
4. Odhadneme statistickou charakteristiku pro aktuální stanici (jako v případě výše).
5. V posledním kroku odhadneme prostorové statistiky pro konkrétní DoY.



Obrázek 5 Postup časového zhodnocení ZTD z externích zdrojů dat.

3.3 Referenční produkt ZTD

Výpočet referenčních hodnot pro ZTD jsme provedli pomocí G-Nut/Tefnut software (Douša et al. 2018). Analýza GNSS dat byla provedena metodou tzv. Precise Point Positioning (Zumberge et al. 1997), pro kterou jsme použili přesné produkty o pozici drah družic a korekcí družicových hodin z Evropské Kosmické Agentury, ESA (http://navigation-office.esa.int/GNSS_based_products.html).

Zpracování jsme provedli s pomocí Kalmanova filtru a zpětného vyhlazení v denních dávkách pro každou stanici zvlášť, přičemž jsme určovali přesné souřadnice dané stanice, korekce hodin na přijímače, počáteční fázové ambiguity, hodnoty ZTD a troposférických gradientů na stanici a každý okamžik filtru. Zpracování jsme provedli ve dvou variantách s využitím dat systémů:

- **Gxxx** - GPS
- **GRxx** - GPS a GLONASS

Při analýze obou GNSS systémů, jsme určovali navíc pro každý přijímač také systematickou chybu mezi časy systémů. U GLONASS jsme systematické chyby mezi jednotlivými frekvencemi neurčovali, protože se tyto prakticky asimilují do počátečních ambiguít. Pro jednotlivé systémy jsme použili apriorní váhy pro odhad přesnosti kódových/fázových observací: 2m/0.02m (GPS) a 3m/0.03m (GLONASS). Elevační maska 7 stupňů byla použita pro filtrování observací při zpracování a všechny observace byly váhovány vůči elevačnímu úhlu pomocí funkce $1/\sin^2(\text{ele})$. Všechny aplikované

modely jsou v souladu s IERS konvencemi 2010 (IERS conventions, 2010), použili jsme nejnovější modely fázových offsetů a variací pro GNSS antény ze souboru igs14_2013.ATX (Schmidt et al. 2016), které jsou plně konzistentní s IGS2014 referenčním rámcem (Rebischung et al. 2016) a poskytovanými produkty přesných poloh družic a korekcí chodu jejich hodin. Troposférické parametry byly určovány v 5min rozlišení pomocí stochastického modelu (random walk proces) s charakteristikami $6\text{mm}/\sqrt{\text{hour}}$ pro ZTD a $0.6\text{mm}/\sqrt{\text{hour}}$ pro horizontální gradienty. Apriorní hodnoty ZTD byly odvozeny z GPT modelu (Böhm et al. 2007) s odhadem neurčitosti 10 cm. Troposférické gradienty byly iniciovány nulovými hodnotami s odhadem neurčitosti 5 mm. Mapovací faktory pro hydrostatickou a vlhkou část troposféry pocházejí z modelu GMF (Böhm et al. 2006), mapovací faktory pro troposférické gradienty pocházejí z modelu Chen and Herring (1997).

Přesnost referenčních GNSS produktů použitých zde pro srovnání s NWM lze charakterizovat směrodatnou odchylkou 3-5mm pro ZTD a systematickou složkou do 1-2 mm. Informace byly do nové verze dokumentu doplněny, např. (Douša et al. 2017, Douša a Václavovic 2016, Douša et al. 2016, Pacione et al. 2017, Kačmařík et al. 2017).

4 Vyhodnocení troposférických produktů

Tato kapitola obsahuje zhodnocení výsledků evaluace troposférických produktů podle postupu popsaného v předchozí části. Součtem korekcí pro hydrostatický a vlhký vliv troposféry určených z numerických modelů počasí (a volitelně klimatických modelů) a jejich porovnání vůči referenčním hodnotám ZTD porovnáme přesnost každého z jednotlivých modelů, ačkoliv pouze s ohledem na celkové určení troposférického zpoždění. Z pohledu potřeb projektu toto považujeme za plně dostačující, navíc vhodnější alternativa jednoduše neexistuje.

Kapitola je rozdělena na tři části. V první jsou souhrnně diskutovány celkové výsledky porovnání všech externích zdrojů dat vůči dvěma referenčním produktům, konkrétně GRxx a Gxxx. Druhá část se zaměřuje na detailní (prostorové a časové) srovnání jednotlivých zdrojů pro odvození ZTD z dat numerických modelů počasí. Třetí část doplňuje porovnání ZTD odhadnutých z klimatických modelů.

4.1 Celkové zhodnocení externích zdrojů

Celkové zhodnocení korekcí odvozených z jednotlivých numerických modelů počasí a klimatických modelů směřuje k odhadu přesnosti jednotlivých modelů bez ohledu na jejich prostorové a časové proměnnosti. V tomto případě použijeme oba referenční výsledky z analýzy GPS a GPS+GLONASS, abychom posoudili vliv referenčního produktu na srovnání NMP. Tabulky 2 a 3 obsahují souhrnné statistiky určené ze ZTD diferencí mezi všemi modely a dvěma sadami referenčních hodnot.

Tabulka 2 obsahuje výsledky srovnání ZTD korekcí určených z jednotlivých NMP. Ze srovnání vychází, že z pohledu určení troposférických korekcí se jeví jako nej přesnější numerický model ALADIN (ALA). V průběhu studovaného měsíce vykazuje průměrnou systematickou chybu -2,8 mm, která je společná všem stanicím, ale stanice od stanice může poměrně významně oscilovat, což naznačuje i hodnota rozptylu tohoto průměru mezi stanicemi (1.7mm). Při srovnání s ostatními dosáhl model

ALADIN přibližně dvakrát menší hodnoty. Směrodatná odchylka ZTD z modelu ALADIN dosahuje 8,0 mm, přičemž jde o hodnotu poměrně stabilní přes všechny stanice (s nejmenším rozptylem).

Největší systematické chyby vykazuje GFS model, a to jak v případě použití interpolace pouze z analýzy (GFS), tak i se simulovaným využitím krátkých předpovědí - 3h (GF3) a 6h (GF6). Regionální model WRF (D01) dává o něco horší výsledky než ERA-Interim (ERA) což lze z části přisoudit skutečnosti, že u ERA-Interim jde o re-analýzu a u WRF (D01) o kombinaci analýzy a krátkodobých předpovědí. Na druhou stranu WRF nedává lepší výsledky ani v porovnání s GFS. Tento výsledek indikuje, že z pohledu výpočtu troposférických korekcí není zahuštění WRF účinné (což však nemusí platit pro jiné účely) pokud byly současně použity počáteční podmínky z GFS.

Téměř zanedbatelné rozdíly můžeme vidět při srovnání statistik s použitím různých referenčních hodnot. Z tohoto pohledu je zřejmé, že pro podrobné srovnání v dalších sekcích můžeme použít pouze jediný zdroj referenčních hodnot, a to optimálně GRxx. Podobně se jeví zanedbatelné i rozdíly v GFS variantách (analýza vs. krátká předpověď).

Tabulka 2: Statistické výsledky celkového zhodnocení ZTD z NMP.

Varianta	NMP data	BIAS [mm]	STDE [mm]	RMSE [mm]
GRxx-ALA	ALADIN	$-2,8 \pm 1,7$	$8,0 \pm 0,8$	$8,6 \pm 0,9$
GRxx-D01	WRF	$-5,6 \pm 2,6$	$10,4 \pm 0,8$	$12,1 \pm 1,4$
GRxx-ERA	ERA-Interim	$-4,7 \pm 3,0$	$9,6 \pm 1,2$	$11,0 \pm 1,4$
GRxx-GFS	GFS, analýza	$-7,9 \pm 2,8$	$8,9 \pm 1,1$	$12,2 \pm 2,0$
GRxx-GF3	GFS, předpověď (3h)	$-7,6 \pm 2,8$	$9,0 \pm 1,1$	$12,0 \pm 2,0$
GRxx-GF6	GFS, předpověď (6h)	$-7,6 \pm 2,9$	$9,2 \pm 1,1$	$12,1 \pm 2,1$
Gxxx-ALA	ALADIN	$-2,9 \pm 1,7$	$8,0 \pm 0,8$	$8,7 \pm 0,9$
Gxxx-D01	WRF	$-5,8 \pm 2,7$	$10,4 \pm 0,9$	$12,2 \pm 1,5$
Gxxx-ERA	ERA-Interim	$-5,0 \pm 3,3$	$9,5 \pm 1,2$	$11,1 \pm 1,6$
Gxxx-GFS	GFS, analýza	$-8,1 \pm 3,0$	$9,0 \pm 1,1$	$12,3 \pm 2,1$
Gxxx-GF3	GFS, předpověď (3h)	$-7,8 \pm 3,0$	$9,0 \pm 1,1$	$12,1 \pm 2,1$
Gxxx-GF6	GFS, předpověď (6h)	$-7,8 \pm 3,0$	$9,1 \pm 1,0$	$12,2 \pm 2,2$

Zhodnocení ZTD z klimatických modelů podle očekávání ukazuje na přesnější výsledky v případě použití moderního modelu GPT2w oproti jednoduchému modelu staršímu skoro o celých 20 let. Nicméně rozdíl není zdaleka veliký a zřetelně poukazuje na fakt výrazného omezení možností zpřesnění klimatických modelů.

Tabulka 3: Statistické výsledky zhodnocení ZTD z klimatických modelů

Varianta	BIAS [mm]	STDE [mm]	RMSE [mm]
GRxx-GPT2W	$17,6 \pm 4,0$	$28,3 \pm 2,2$	$33,6 \pm 2,2$
GRxx-MOPS	$20,4 \pm 7,7$	$29,2 \pm 2,4$	$36,1 \pm 3,7$
Gxxx-GPT2W	$17,6 \pm 3,8$	$28,2 \pm 2,4$	$33,5 \pm 2,3$
Gxxx-MOPS	$20,2 \pm 7,8$	$29,2 \pm 2,4$	$36,0 \pm 3,8$

Nakonec porovnání přesnosti numerických modelů počasí a z klimatických modelů z pohledu určení korekcí pro celkové troposférické zpoždění vykazuje až třikrát lepší výsledky získané z NMP, tj. při využití aktuálních informací o atmosféře.

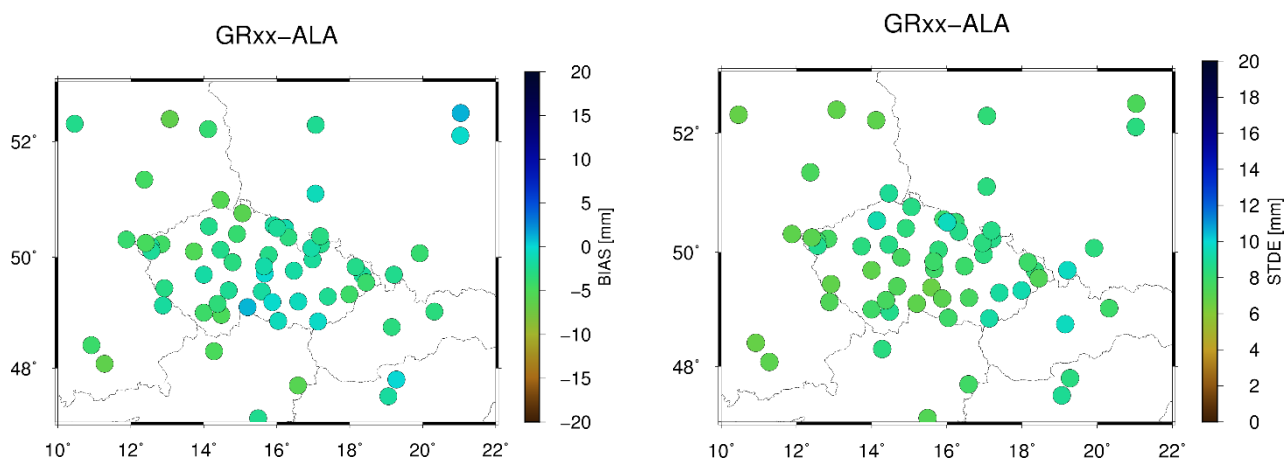
4.2 Zhodnocení ZTD z numerických modelů počasí

V této části postupně zhodnotíme všechny dostupné externí zdroje vůči referenčním hodnotám určených s pomocí GPS a GLONASS (GRxx).

1.1.1 Regionální model ALADIN

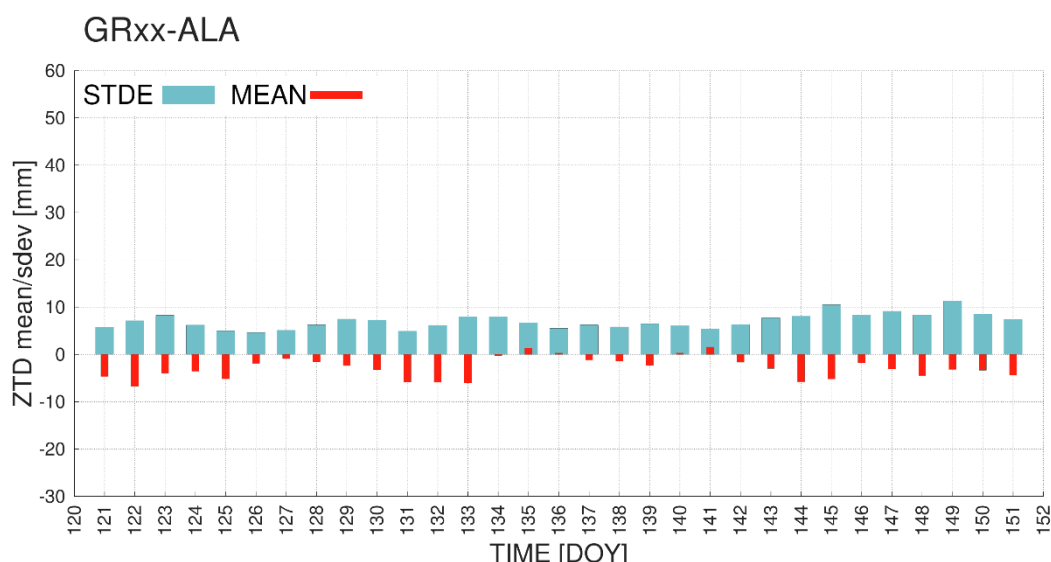
Obrázek 6 ukazuje prostorové rozložení systematických chyb a směrodatných odchylek ZTD určených z modelu ALADIN - CZ (ALA) vůči referenčním hodnotám z GNSS. V levém panelu jsou zobrazeny systematické chyby a v pravém panelu směrodatné odchylky.

Výsledky systematických chyb této kombinace poukazují na dobrou konzistenci v tom smyslu, že žádná stanice nevykazuje extrémní hodnoty. Hodnoty systematických chyb jsou u většině stanic záporné. Odhad průměrné systematické chyby je $-2,77 \pm 1,71$ mm směrodatné odchylky $8,0 \pm 0,80$ mm. O málo vyšší hodnoty lze pozorovat v daném období na hranici ČR a SR, přesto jde o zanedbatelné rozdíly v rámci provedené analýzy.



Obrázek 6: Prostorové rozložení systematických chyb (vlevo) a směrodatných odchylek (vpravo) v ZTD určených regionálního modelu ALADIN

Obrázek 7 zobrazuje časový vývoj systematické chyby a směrodatné odchylky v průběhu celého měsíce května roku 2018. Z obrázku lze pozorovat, že průměrná směrodatná odchylka přes všechny stanice se v průběhu dnů a studovaného období příliš výrazně neměnila, naopak průměrná systematická chyba nabývala kladných poměrně proměnných hodnot, zejména například ve dnech v roce (DoY) 135-136 a 140-141.

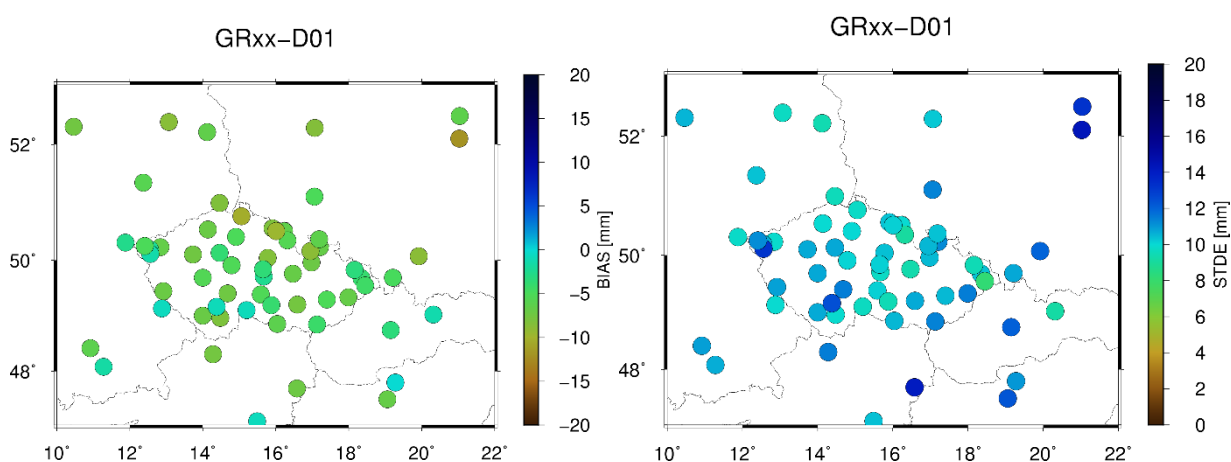


Obrázek 7: Vývoj systematické chyby a směrodatné odchylky v průběhu studovaného období.

4.2.1 Regionální model WRF

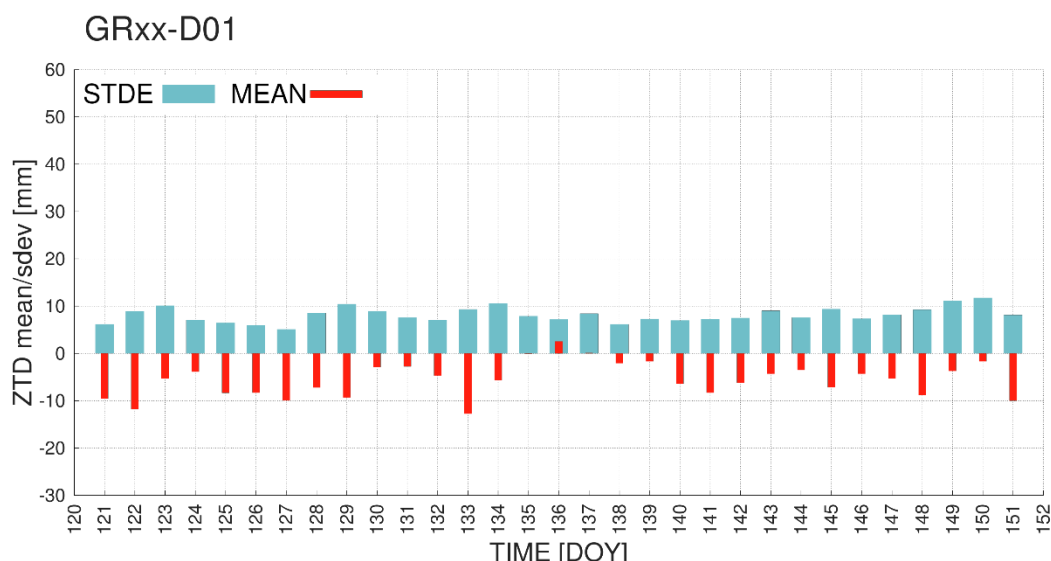
Obrázek 8 zobrazuje výsledky prostorové analýzy zhodnocení regionálního modelu WRF (D01) vůči referenčním hodnotám z GNSS. V levém panelu jsou zobrazeny systematické chyby a v pravém panelu směrodatné odchylky.

U WRF modelu je obecně patrný větší rozptyl statistických parametrů. Průměrná prostorová systematická chyba této kombinace je $-5,6 \pm 2,6$ mm což je zhruba dvakrát větší než v případě modelu ALADIN. Tento odhad úzce souvisí s inicializací modelu pomocí dat z globálního GFS modelu. Průměrná směrodatná odchylka je charakterizována hodnotou $10,4 \pm 0,8$ mm. Zde je především vidět výskyt stanic s vyššími hodnotami u obou statistik, což může být způsobeno řadou faktorů charakterizujících model, mimo jiné až dvakrát nižším prostorovým rozlišením modelu oproti modelu ALADIN, ale i nezanedbatelným faktem je, že v modelu nejsou asimilována data.



Obrázek 8: Prostorové rozložení systematických chyb (vlevo) a směrodatných odchylek (vpravo) v ZTD určených regionálního modelu WRF

Časový vývoj statistických charakteristik ve sledovaném období má podobný charakter jako v předcházející situaci, ovšem s trochu vyšším rozptylem v denní systematické chybě a obecně vyšší směrodatné odchylce.



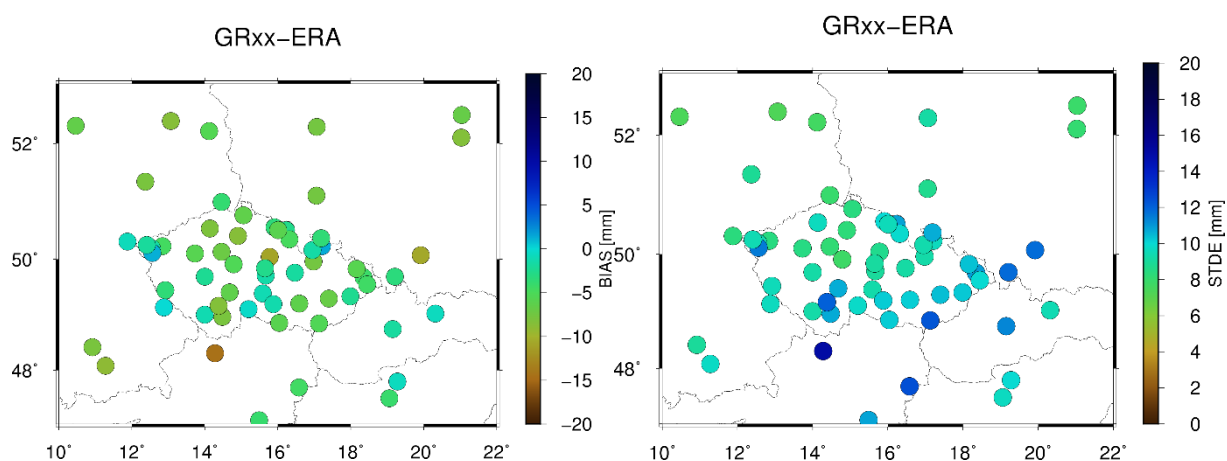
Obrázek 9: Vývoj systematické chyby a směrodatné odchylky v průběhu studovaného období.

4.2.2 Globální model ERA-Interim

V kombinaci rozdílů ZTD z numerického modelu počasí ERA-Interim a referenčních hodnot z GNSS vidíme významnější prostorový rozptyl dosažených výsledků jak systematických chyb, tak také směrodatných odchylek, viz

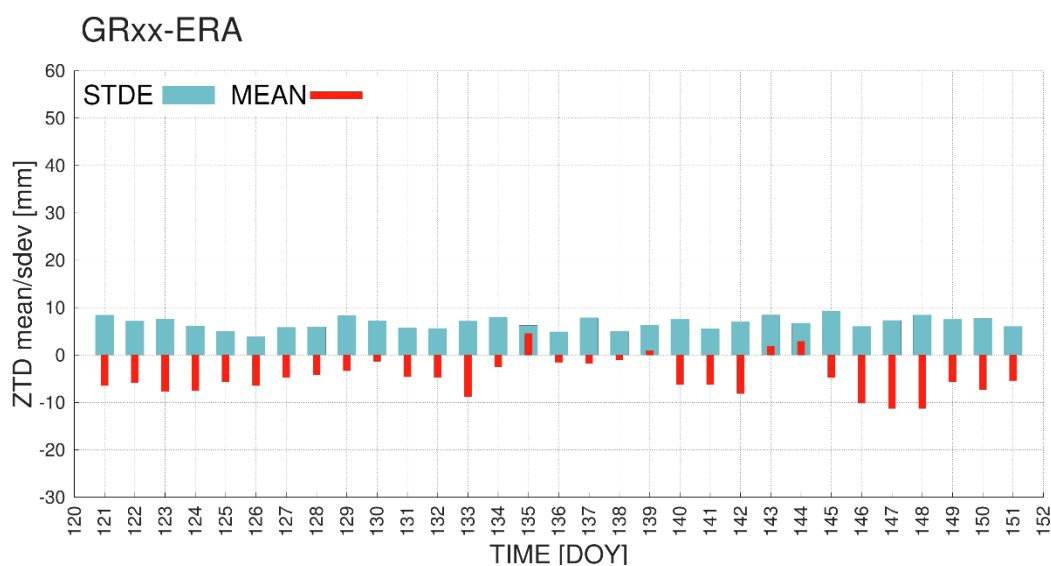
Obrázek 10. Vyšší rozptyl systematických chyb z geografického hlediska poukazuje na skutečnost, že model má výrazně nižší horizontální rozlišení a podle toho i horší orografii, která negativně ovlivňuje kvalitu modelování. Potvrzuje to i situace na jedné stanici v Rakouských Alpách, kde dochází k nepřesnostem zejména kvůli modelování ve výškových hladinách, které ve skutečnosti neodpovídají velmi dobře skutečné orografii terénu a vertikálnímu členění atmosféry v takové situaci. Výjimku můžeme pozorovat jak v přítomnosti výrazné systematické chyby, která je až dvakrát větší než u ostatních, tak celkové směrodatné odchylky určené ze srovnání.

Průměrná systematická chyba ZTD z ERA-Interim je $-4,7 \pm 3,0$ mm a směrodatná odchylka je $9,6 \pm 1,2$ mm, což jsou výsledky o něco lepší než v případě hodnocení modelu WRF, ale evidentně problematictější v případě výraznějšího vlivu orografie.



Obrázek 10: Prostorové rozložení systematických chyb (vlevo) a směrodatných odchylek (vpravo) v ZTD určených globálního modelu ERA-Interim

Časový vývoj sledovaných statistik ukazuje vyšší variabilitu v denních hodnotách průměrné systematické chyby a o něco menší pak i směrodatné odchylky.



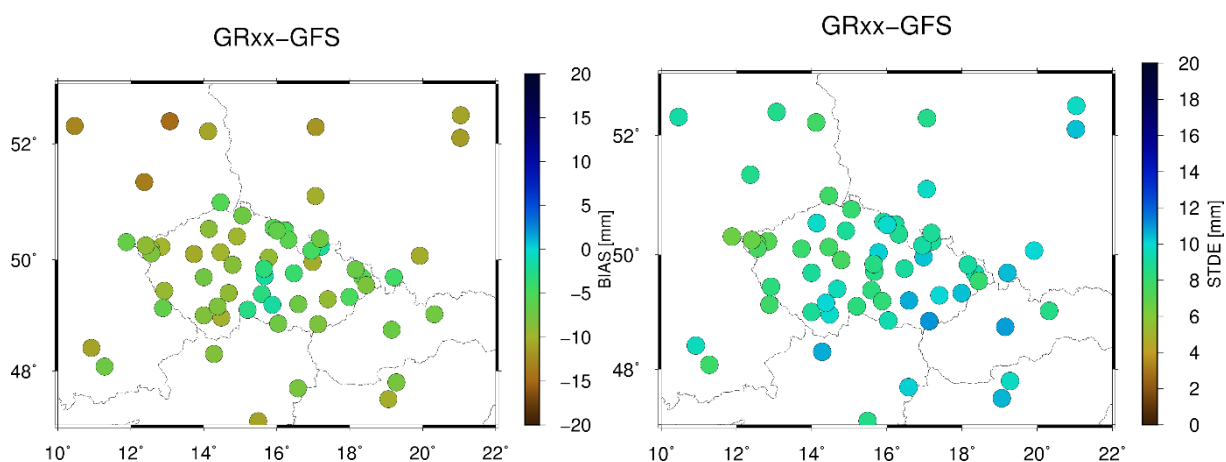
Obrázek 11: Vývoj systematické chyby a směrodatné odchylky v průběhu studovaného období

4.2.3 Globální model GFS

V rozdílech ZTD mezi numerickým modelem počasí GFS (zde zhodnotíme pouze analýzu) a referenčních hodnot z GNSS vidíme větší variabilitu (a obecně vyšší hodnoty) u systematických chyb, pokud GFS porovnáme se všemi ostatními modely. Na druhou vychází jako druhý nejlepší (po ALADIN) z pohledu směrodatné odchylky včetně prostorové variability.

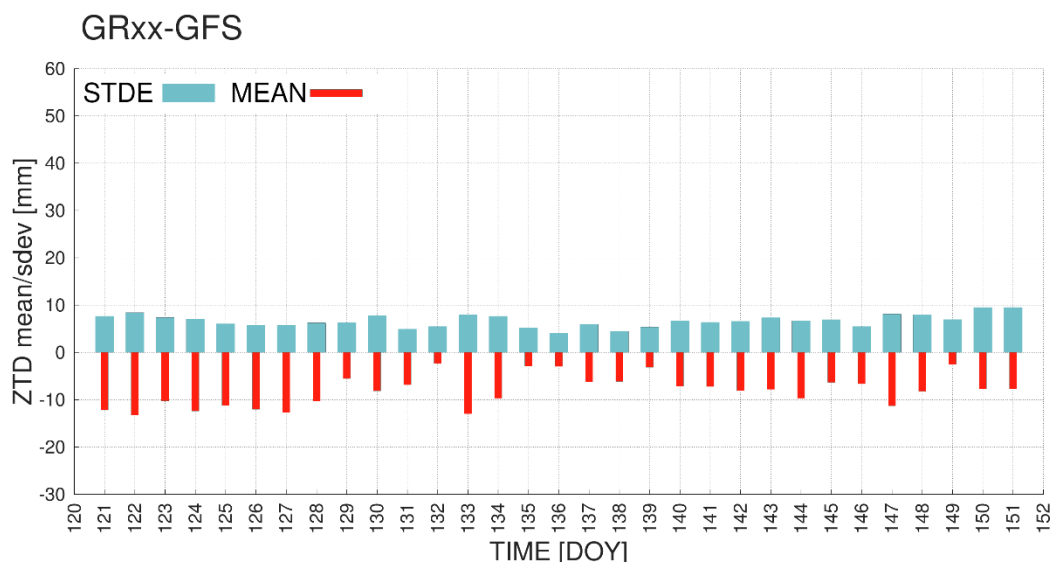
Průměrná systematická chyba ZTD z GFS je $-7.9 \pm 2,8$ mm a směrodatná odchylka je $9,0 \pm 1,1$ mm, což jsou výsledky o něco horší v případě systematických chyb, ale výrazně lepší v případě

směrodatných odchylek pro porovnání s modelem WRF, pro který je GFS vstupem. Zdá se, že v porovnání s ERA-Interim jsou hodnoty směrodatných odchylek dokonce stabilnější a vliv orografie terénu se zdá menší. Na rozdíl od ostatních používá GFS model tlakové hladiny pro vertikální reprezentaci parametrů a tyto jsou obecně vyjadřovány bez ohledu na skutečnou orografii terénu.



Obrázek 12: Prostorové rozložení systematických chyb (vlevo) a směrodatných odchylek (vpravo) v ZTD určených globálního modelu GFS

Obrázek 13 zobrazuje časový vývoj sledovaných statistik, zejména pak obecně vyšší zápornou systematickou chybu v porovnání se všemi předchozími modely, která v celém období zůstává poměrně stabilní. Denní variability ve směrodatné odchylce je zejména vůči WRF/D01, který by měl GFS vylepšovat, je o něco nižší.



Obrázek 13: Vývoj systematické chyby a směrodatné odchylky v průběhu studovaného období

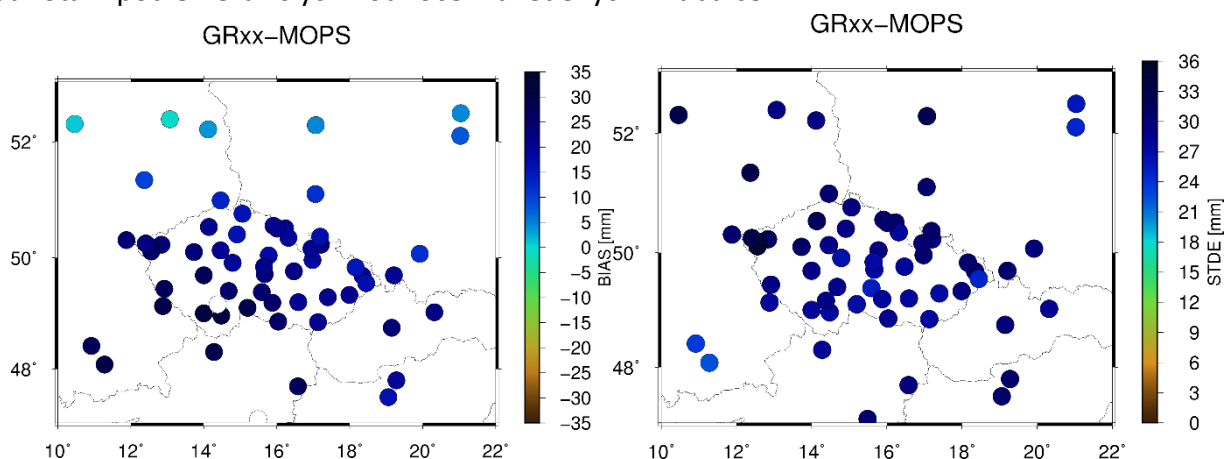
4.3 Zhodnocení klimatických modelů

Podobně jako u ZTD z NMP provedeme srovnání ZTD určených z klimatologických blind modelů MOPS a GPT2w, opět pouze vůči referenčním hodnotám z GNSS (GRxx).

4.3.1 RTCA MOPS model

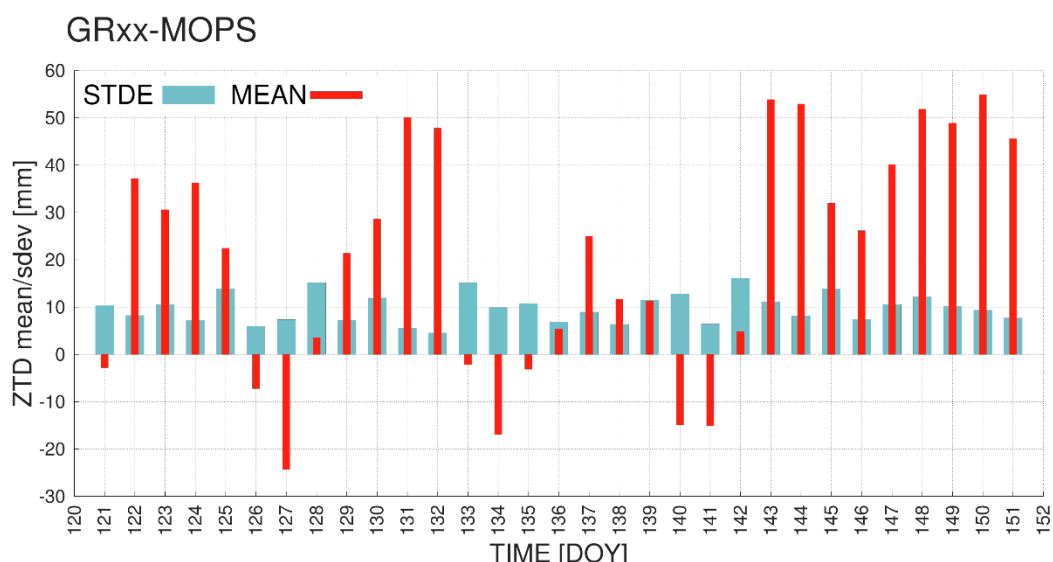
Obrázek 14 ukazuje výsledky analýzy porovnání ZTD z klimatického modelu RTCA MOPS. Geografické rozložení celkových systematických chyb na stanicích zřetelně poukazuje na výrazné zonální rozložení hodnot klesajících s narůstající zeměpisnou šířkou. Výsledky zřejmě souvisí s definicí MOPS modelu, který je definován formou průměrných hodnot a jejich sezónních variací, které jsou pro naše území daný měsíc téměř konstantní, jak to bylo ukázáno v kapitole 2.3.1.

Průměrná prostorová hodnota systematické chyby MOPS modelu odvozená na základě daného vzorku stanic je $20,4 \pm 7,7$ mm a směrodatná odchylka $29,2 \pm 2,4$ mm. Ze srovnání vidíme zhruba třikrát nižší přesnost než v případě všech analýz dat z numerických modelů počasí, a to v obou charakteristikách – systematické chybě i směrodatné odchylce. Výsledky odpovídají očekávaným hodnotám podle nezávislých hodnocení uvedených v Tabulce 1.



Obrázek 14: Prostorové rozložení systematických chyb (vlevo) a směrodatných odchylek (vpravo) v ZTD určených blind modelu MOPS

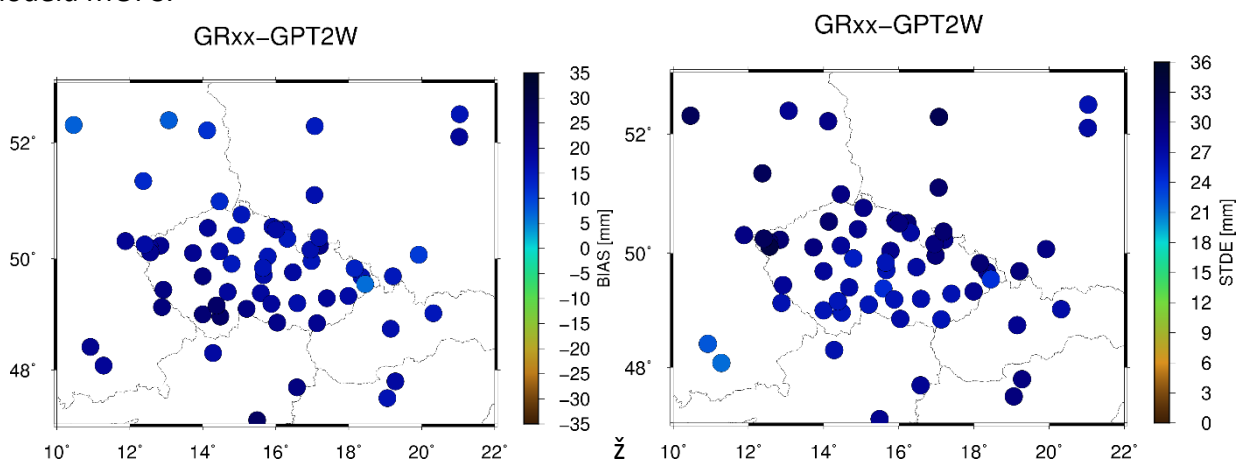
Výsledky časového průběhu sledovaných statistik v daném časovém období měsíce květen poukazují na značnou variabilitu, především v dnech 122-125, 129-132, ale i na konci měsíce je vidět vysoké odchylky zejména v případě systematické chyby, které dosahují více než 50 mm.



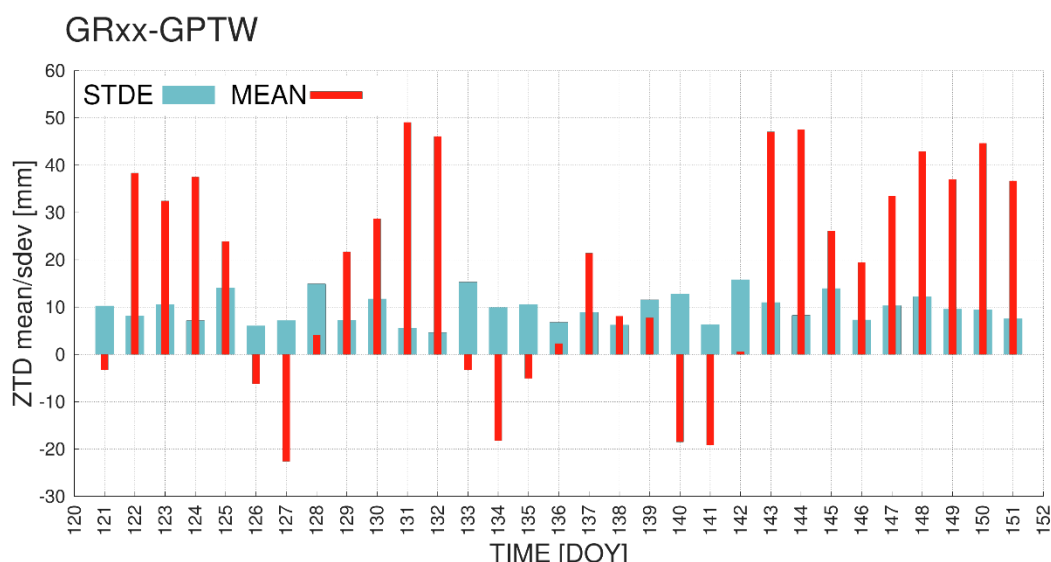
Obrázek 15: Vývoj systematické chyby a směrodatné odchylky v průběhu studovaného období.

4.3.2 GPT2w model

Prostorové srovnání výsledků srovnání ZTD z klimatického modelu GPT2w v tomto případě již nevykazují tak výrazně systematické chyby v závislosti na zeměpisné šířce jak jsme pozorovali u MOPS modelu. Průměrná systematická chyba je $17,6 \pm 4,0$ mm a směrodatné odchylka $28,3 \pm 2,2$ mm. V tomto případě není rozdíl směrodatných odchylek mezi modely GPT2w a MOPS nijak výrazný, což souvisí s výběrem stanic a časového intervalu, ale lze očekávat, že globálně jsou výsledky rozdílnější. Časový vývoj sledovaných statistik ukazuje obrázek 14. Statistiky jsou rovněž podobné srovnání modelu MOPS.



Obrázek 16: Prostorové rozložení systematických chyb (vlevo) a směrodatných odchylek (vpravo) v ZTD určených regionálního modelu GPT2w.



Obrázek 17: Vývoj systematické chyby a směrodatné odchylky v průběhu studovaného období.

5 Závěr

V tomto dokumentu byly porovnány hodnoty ZTD z NMP, určené součtem ZWD a ZHD z vybraných externích zdrojů dat (modelů), vůči referenčním hodnotám ZTD z GNSS. Cílem bylo vyhodnotit přesnost a použitelnost jednotlivých zdrojů pro účel poskytování dat pro tvorbu troposférického modelu. Konkrétně jsme zhodnotili čtyři numerické modely počasí a pro kompletnost jsme je doplnili dvěma reprezentativní modely klimatickými.

V první části jsme definovali parametry troposférického zpoždění použité při zhodnocení a stručně jsme popsali základní charakteristiky vybraných NMP a klimatických modelů. Druhá část dokumentu popisuje metodu zhodnocení modelů z hlediska prostorového, časového a celkového, a současně jsme popsali volbu stanic a přípravu referenčních hodnot určených z GNSS dat na stanicích. Podrobné výsledky srovnání zhodnocení jsou potom součástí hlavní části dokumentu.

5.1 Shrnutí výsledků evaluace

Srovnání klimatických modelů ukázalo, že mohou poskytnout pouze velmi omezené informace o troposféře, respektive jejím vlivu na zpoždění signálu GNSS. Tato omezení plynou z vlastní konstrukce klimatických modelů, která předpokládá časovou extrapolaci určených parametrů. Přesnost modelů je potom silně závislá na místě a době použití troposférických korekcí. Z tohoto důvodu s modely hodí především pro hrubou aproximaci či inicializaci vlivu troposféry na signál GNSS.

Evaluace výsledků troposférických zpoždění odvozených z NMP ukázalo, že data z numerických modelů (včetně krátkých předpovědí) poskytují více než 3× větší přesnost než v případě použití klimatických dat. NMP tím nabízí širší možnosti využití i v přesných GNSS analýzách, zejména potom je-li observační kampaň krátká, jedná-li se o kinematický či semi-kinematický mód zpracování apod. V případě numerických modelů provádíme časovou interpolaci, kterou lze i v čase blízkém reálnému

provádí přímo z numerické předpovědi počasí. Obecně se přesnost studovaných modelů počasí (ALADIN, WRF, ERA-Interim a GFS) ukázala jako poměrně konzistentní se statistickými hodnotami RMSE 8-12mm a systematických chyb do 8mm.

Rozdíly lze pozorovat zejména v souvislosti s prostorovým uspořádáním modelů (regionální a globální), jejich časové i prostorové rozlišení (a zejména výškové), režim dostupnosti (re-analýza vs. předpověď) apod. Na základě výběru stanic a zájmového území, výsledky ukazují, že nejpřesnější ZTD z pohledu systematických chyb a směrodatných odchylek byly určeny z regionálního modelu ALADIN. Tento výsledek bylo víceméně možné očekávat, protože ALADIN je skutečně optimalizován pro Českou republiku z hlediska parametrů i použitých modelů, má nejvyšší časové (1h) a prostorové rozlišení (4,7km). Výsledky všech dalších NMP ovšem výrazně nezaostávají, což lze kladně hodnotit zejména z ohledu nižšího časového a prostorového rozlišení i dalších aspektů. Podle našich předchozích zkušeností můžeme dobře předpokládat (Douša et al. 2016), že srovnání provedené v průběhu května 2018 lze považovat za zcela reprezentativní výsledky pro území našeho zájmu. Lze konstatovat, že všechny studované modely poskytly výsledky využitelné pro účely vývoje troposférického modelu na území České republiky či centrální Evropy, proto hlavním aspektem pravděpodobně nebudou rozdíly v přesnosti, ale aspekty optimální dostupnosti a použitelnosti.

5.2 Doporučení vhodného modelu

Ačkoliv ALADIN model se jeví z hlediska přesnosti jako optimální pro přípravu troposférických korekcí v ČR, přesnost je poměrně výrazně zaplácena velkým objemem dat (87MB/soubor), který odpovídá výrazně vyššímu horizontálnímu (4.7km) a vertikálnímu (87 hladin) rozložení oproti jiným modelům (při hodinovém rozlišení modelu tak objem dat činí minimálně 2GB/den). Tato hodnota již zahrnuje významnou redukci parametrů na ty, které jsou nezbytné k výpočtu troposférických korekcí.

Hlavní problém modelu ALADIN se však jeví v reálné dostupnosti dat (včetně dostupnosti pro účely státní správy). Přístup k originálním datům ve skutečnosti neexistuje a služba poskytnutí dat z archívu i operativní předpovědi je podle dostupných informací vždy zpoplatněna (navíc obsahuje reformátování a přesuny, extrakci parametrů apod.).

Všechny ostatní modely vykazují víceméně podobnou kvalitu výsledků (RMSE=12mm), přičemž před vlastním doporučením lze shrnout další aspekty:

- WRF model – druhý regionální model (na ČR orientovaný) – má sice velmi dobré rozlišení v čase (1h) i v prostoru (9 km horizontálně a 38 vertikálních hladin), bohužel z pohledu ZTD evaluace nevykazuje žádné zlepšení vůči GFS modelu, pomocí kterého je iniciován. Výsledky evaluace ukázaly pouze na malé zlepšení v průměrné systematické chybě, ale naopak zhoršení ve směrodatné odchylce, celkově v RMSE o málo horší výsledky než GFS. Objem dat pro jeden den činí zhruba cca 4 GB v komprimovaném formátu NetCDF v4, tentokrát ovšem při originální velikosti souborů, tj. se všemi parametry modelovanými v NMP.
- ERA-Interim je globální model s nízkým horizontálním (1°) a vysokým vertikálním (60 hladin) rozlišením. Data jsou bezplatně poskytována pro nekomerční využití (po registraci), jsou k dispozici v historickém archívu zpětně až do roku 1979, není všem možný přístup k datům za

poslední tři měsíce. Velikost souboru redukovaného před stahováním pouze na vybrané parametry činí 18MB, což představuje cca 90MB/den při intervalu analýz každých 6 hodin.

- GFS model lze charakterizovat relativně nízkými nároky na objem, pokud je využíváno horizontální rozlišení 1° (dostupné je od určité doby i rozlišení $0,5^\circ$ a $0,25^\circ$). Z historického archívu lze stahovat pouze neredukované soubory (20MB), v reálném čase lze potom efektivní sub-sety stahovat pomocí datového filtru, čímž lze dosáhnout velikost souboru 4.1MB (tj. při 3h rozlišení činí 37MB/den). Vertikálně je model charakterizován 31 izobarickými hladinami. Data modelu jsou volně dostupná pro komerční i nekomerční účely (bez nutné registrace), v archívu do roku 2004 a v operativním režimu analýz s předpověďmi až do horizontu 3.5 dní. Také z hlediska udržitelnosti přístupu lze model charakterizovat jako stabilní a předvídatelný, protože je na něm již dlouhou dobu založena řada komerčních i nekomerčních služeb po celém světě.

Na základě evaluace a zhodnocení dalších aspektů spojených s objemem a hlavně dostupností dat se GFS model nabízí jako optimální kompromis pro Českou republiku a proto bychom ho doporučili pro použití v dalších fázích vývoje přesného troposférického modelu pro zpřesnění GNSS měření.

Seznam referencí

- Askne J, Nordius H (1987) Estimation of Tropospheric Delay for Microwaves from Surface Weather Data. *Radio Science*, vol. 22, No. 3, Pp. 379–386.
- Böhm J, Heinkelmann R, Schuh H (2007) Short note: A global model of pressure and temperature for geodetic applications. *Journal of Geodesy*, 81, 679–683, doi:10.1007/s00190-007-0135-3
- Böhm J, Niell A, Tregoning P, Schuh H (2006) Global mapping function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data. *Geophysical Research Letters*, 33, 943–951, doi:10.1029/2005GL025546
- Böhm J, Möller G, Schindelegger M, Pain G, Weber R (2015) Development of an improved empirical model for slant delays in the troposphere (GPT2w). *GPS Solutions*, vol. 19, no. 3, pages 433–441
- Chen G, Herring TA (1997) Effects of atmospheric azimuthal asymmetry on the analysis of space geodetic data, *J. Geophys. Res.*, 102(B9), 20489–20502, doi: 10.1029/97JB01739.
- Collins JP (1999) Assessment and Development of a Tropospheric Delay Model for Aircraft users of the Global Positioning System. *Rapport technique*
- Dee DP and 35 co-authors (2011) The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 137(656), 553–597, doi:10.1002/qj.828.
- Douša J, Eliaš M, Veerman H, van Leeuwen SS, Zelle H, de Haan S, Martellucci A, Perez RO (2015) High Accuracy Tropospheric Delay Determination Based on Improved Modelling and High Resolution Numerical Weather Model. In *Proceedings of the 28th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2015)*, Tampa, Florida, Pp. 3734–3744.
- Douša J, Václavovic P (2016), Evaluation of ground-based GNSS tropospheric products at Geodetic Observatory Pecny, In: *IAG 150 Years*, Rizos Ch. and Willis P. (eds), *IAG Symposia Series*, Vol. 143, pp. 759–766
- Douša J, Dick G, Kačmařík M, Brožková R, Zus F, Brenot H, Stoycheva A, Möller G, Kaplon, J (2016), Benchmark campaign and case study episode in central Europe for development and assessment of advanced GNSS tropospheric models and products, *Atmos. Meas. Tech.*, 9, 2989–3008
- Douša J, Václavovic P, M. Eliaš (2017), Tropospheric products of the second European GNSS reprocessing (1996–2014), *Atmos. Meas. Tech.*, 10:1–19, doi:10.5194/amt-10-3589-2017
- Douša J, Václavovic P, Zhao L, Kačmařík M (2018), New Adaptable All-in-One Strategy for Estimating Advanced Tropospheric Parameters and Using Real-Time Orbits and Clocks. *Remote Sens.* 10, 232. doi:10.3390/rs10020232.
- Herring T (1992) Modeling Atmospheric Delays in the Analysis of Space Geodetic Data. In: De Munck JC, Spoelstra TA (Eds), *Proceedings of Refraction of Transatmospheric Simals in Geodesy*, Geodetic Commission Publications on Geodesy, Netherlands.
- IERS Conventions: Gérard, P., Luzum, B. (Eds.) (2010) *IERS Technical Note No. 36*, Frankfurt am Main, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 179 pp.

- Kačmařík M, Douša J, Dick G, Zus F, Brenot H, Möller G, Pottiaux E, Kapłon J, Hordyniec P, Václavovic P, Morel L (2017) Inter-technique validation of tropospheric slant total delays, *Atmos. Meas. Tech.*, 10:2183-2208
- Lagler K, Schindelegger M, Böhm J, Krásná H, Nilsson T (2013) GPT2: Empirical slant delay model for radio space geodetic techniques. *Geophysical Research Letters*, vol. 40, no. 6, pages 1069–1073, 2013
- Li W, Yuan YB, Ou JK, Li H, Li YS (2012) A new global zenith tropospheric delay model IGGtrop for GNSS applications. *Chinese Science Bulletin*, vol. 57, no. 17, pages 2132–2139
- Martellucci A (2012) Galileo reference troposphere model for the user receive. Rapport technique ESA-APPNG-REF/00621-AM v2.7, European Space Agency.
- Pacione R, Araszkiewicz A, Brockmann E, Douša J (2017), EPN-Repro2: A reference GNSS tropospheric data set over Europe, *Atmos. Meas. Tech.*, 10:1689-1705
- Saastamoinen J (1972) Atmospheric Correction for Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging of Satellites. In S. W. Henriksen, A. Mancini and B. H. Chovitz, editors, *The Use of Artificial Satellites for Geodesy*, volume 15 of Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series.
- Rebischung P, Altamimi Z, Ray J, Garayt B (2016) The IGS contribution to ITRF2014. *J Geod* 90(7):611–630, DOI 10.1007/s00190-016-0897-6
- RTCA SC-159 (2006) Minimum operational performance standards for global positioning system/wide area augmentation system airborne equipment. RTCA, 2006.
- Schmid R, Dach R, Collilieux X, Jaeggi A, Schmitz M, Dilssner F (2016) Absolute IGS antenna phase center model igs08.atx: status and potential improvements. *J Geod* 90(4): 343-364, doi: 10.1007/s00190-015-0876-3
- Schüller T (2014) The TropGrid2 standard tropospheric correction model. In: *GPS Solutions*, vol. 18, no. 1, pages 123–131, 2014.
- The U.S. Standard Atmosphere (1976) Sponsorship of National Oceanic and Atmospheric Administration, National Aeronautics and Space Administration, U.S. Air Force, U.S. Government Printing Office, Washington, D. C.
- Václavovic P, Douša J (2015) Backward smoothing for precise GNSS applications. *Advances in Space Research*, 56, 8, 1627-1634, doi:10.1016/j.asr.2015.07.020.
- Yao Y, Hu Y, Yu C, Zhang B, Guo J (2016) An improved global zenith tropospheric delay model GZTD2 considering diurnal variations. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 23:127–136.
- Zumberge JF, Heflin MB, Jefferson DC, Watkins MM, Webb FH (1997) Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysics Research*. Vol. 102, 1997, pp. 5005-5018.

Příloha: Souřadnice použitých stanic v analýze

STATION	LON [°]	LAT [°]	HELL [m]	STATION	LON [°]	LAT [°]	HELL [m]
AUBG	10,9213	48,4213	508,677	GRAZ	15,4935	47,0671	538,298
BBYS	19,1510	48,7518	487,425	HABA	12,5523	50,1855	576,022
BEZD	16,2293	50,5087	539,512	HOFJ	11,8759	50,3129	614,935
BOGI	21,0352	52,4750	139,921	JOZE	21,0315	52,0973	141,440
BOR1	17,0735	52,2770	124,370	KRAW	19,9205	50,0661	267,136
BUTE	19,0565	47,4809	180,811	KUNZ	15,2009	49,1073	702,531
CBUD	14,4753	48,9676	456,232	KYNS	12,5560	50,1128	569,801
CDOM	12,9241	49,4459	519,612	LDB2	14,1209	52,2091	159,477
CFRM	18,3532	49,6848	373,600	LEIJ	12,3741	51,3540	178,397
CHOD	17,1291	48,8496	228,399	LINZ	14,2831	48,3098	335,042
CHOT	15,6727	49,7117	603,878	LITO	14,1448	50,5422	244,728
CJES	17,2082	50,2328	495,237	LUBY	12,4077	50,2481	587,619
CJIH	15,5864	49,3936	576,855	LYSH	18,4476	49,5462	1 374,923
CKRO	17,4002	49,2975	258,595	OBE4	11,2779	48,0848	650,504
CKVA	12,8419	50,2326	446,088	PENC	19,2815	47,7896	291,751
CLIB	15,0599	50,7717	448,366	POL1	16,3223	50,3502	791,734
CLIT	14,1403	50,5403	243,289	POTS	13,0661	52,3793	144,429
CMBO	14,9060	50,4129	303,478	PTBB	10,4598	52,2962	130,252
CPAR	15,7833	50,0396	283,283	SECZ	15,6494	49,8429	582,374
CPRA	13,9959	49,0143	645,402	SLUK	14,4603	50,9999	424,018
CPRG	14,4561	50,1252	356,028	SPRN	16,5831	47,6836	278,887
CPRI	13,9983	49,6878	583,689	STAM	16,9478	50,1623	603,423
CRAK	13,7292	50,1024	381,883	TEME	14,3799	49,1740	563,475
CSUM	16,9810	49,9648	378,379	TREB	15,8787	49,2040	528,832
CSVJ	16,4713	49,7578	498,457	TUBO	16,5928	49,2059	324,287
CTAB	14,6802	49,4098	496,246	UPIC	16,0109	50,5071	467,945
CTRU	15,9085	50,5626	478,608	VIDN	17,1854	50,3729	291,662
CVSE	17,9910	49,3380	407,336	VSBO	18,1638	49,8335	340,921
CZNO	16,0392	48,8640	373,860	WROC	17,0620	51,1133	180,825
GANP	20,3229	49,0347	746,049	WTZR	12,8789	49,1442	666,028
GOP6	14,7856	49,9137	592,609	ZYWI	19,2060	49,6867	412,783
GOPE	14,7856	49,9137	592,622				