## Spracovanie a asimilácia GNSS dát pre účely SHMÚ

MARTIN IMRIŠEK, Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava

17. októbra 2017

#### Abstract

Global navigational satellite system signals are delayed and bent when propagating through the atmosphere. We are determining this delay (called zenith total delay) with network solution at near real time on 59 GNSS stations over the Europe. The quality check of zenith total delays was performed over one month period, based on first guess departures. After computation of static bias corrections for all approved stations, we was able to assimilate zenith total delays in AROME with three-dimensional data assimilation system. First technical case study was carried out on incoming frontal system on 2nd October 2017. The assessment of data assimilation impact was performed on three hour accumulated rainfall predictions. Examination of this study reveals the ability of the zenith total delay assimilation to modify the intensity and location of precipitating areas.

Anotation : This report discusses about determination, quality testing, data assimilation of zenith total delay with 3D–var in model AROME and assessment of impact to numerical weather predictions.

Keywords: zenith total delay, 3D-var data assimilation, numerical weather prediction

Anotácia : Tento príspevok pojednáva o určovaní, testovaní kvality, asimilácií zenitového totálneho oneskorenia pomocou 3D–var do modelu AROME a ohodnotení dopadu na numerické predpovede počasia.

Kľúčové slová : zenitové totálne oneskorenie, 3D–var data asimilácia, numerické predpovede počasia

## 1 Úvod

Globálne navigačné satelitné systémy (GNSS) nám v dnešnej dobe poskytujú takmer neobmedzené možnosti v oblasti určovania polohy. Väčšina ľudí sa stretne s využitím určovania polohy iba na účely navigácie. Existujú ale aj iné odvetvia kde sa uplatnia merania signálov vysielaných z družíc Globálnych navigačných satelitných systémov. Implementácia tejto technológie siaha od tých na presnosť najnáročnejších aplikácii, ako je tvorba a udržiavanie aktívnych geodetických základov, cez pozorovanie zmien parametrov orientácie Zeme, určovanie počtu elektrónov v ionosfére a obsahu vodných pár v atmosfére. Na katedre Geodetických základov sa venujeme výpočtu, analýze a následnému využitiu zenitového totálneho oneskorenia. Zenitové totálne oneskorenie (ZTD) je definované ako celkové oneskorenie prichádzajúceho signálu z družice v smere zenitu spôsobeného prechodom signálu cez atmosféru. V jednoduchosti je princíp určovania ZTD založený na váhovaní šikmých totálnych oneskorení z jednotlivých satelitov podľa mapovacej funkcie, ktorá zohľadňuje zenitový uhol prichádzajúceho signálu z danej družice a stav atmosféry. Moderné mapovacie funkcie ako napríklad Vienna Mapping Function (Böhm et al., 2006a) sú tvorené koeficientami odhadnutými pomocou klimatologických dát alebo pomocou numerických predpovedných modelov počasia. Jednoduchou ale názornou je mapovacia funkcia, ktorá váhuje prichádzajúci signál kosínusom zenitového uhla tejto družice. Zenitové totálne oneskorenie dosahuje priemerné hodnoty okolo 2,6 m na staniciach na úrovni hladiny mora. Treba si uvedomiť, že táto hodnota prirodzene klesá s narastajúcou nadmorskou výškou a so zväčšujúcou sa zemepisnou šírkou, pretože hrúbka atmosféry je menšia na póloch ako na rovníku. Zenitové oneskorenie má prívlastok totálne, pretože prichádzajúci signál z družice je oneskorený nie len vďaka suchému vzduchu ale aj vďaka vode v atmosfére či už v plynnom, tekutom alebo pevnom skupenstve. Preto zenitové totálne oneskorenie rozdeľujeme na hydrostatické a vlhké oneskorenie, toto rozdelenie navrhol Davis et al. (1985). Ak by sme chceli vyjadriť pomer medzi hydrostatickou a vlhkou zložkou zistili by sme, že hydrostatická zložka tvorí asi 90% z celkového oneskorenia a vlhká zložka tvorí zvyšných 10%. V meteorológii sa používa, a viac názorná je transformovaná hodnota zenitového vlhkého oneskorenia na výšku vodného stlpca v milimetroch (Precipitable Water Vapour - PWV). Táto hodnota nám indikuje koľko milimetrov kondenzovanej vody sa nachádza v profile nad stanicou. Túto transformáciu navrhol Bevis et al. (1994) a je pri nej nutné poznať meteorologické informácie In situ o teplote a tlaku.

## 2 Určovanie a analýza zenitového totálneho oneskorenia

Permanentné GNSS stanice zaznamenávajú signál každých pätnásť sekúnd zo všetkých satelitov nad horizontom. Z týchto záznamov sa následne produkujú hodinové súbory meraní, ktoré sú spoločné pre všetky druhy spracovania. Spracovanie meraní GNSS rozdeľujeme z pohľadu oneskorenia na finálne riešenie – najpresnejšie výsledky, najpresnejšie polohy družíc a korekcie ale oneskorenie výsledkov je približne 21 dní, riešenie v takmer reálnom čase – pri tomto riešení používame ultra-rapid, respektíve predikované polohy družíc a korekcie, oneskorenie výsledkov je menej ako hodina. Riešenie v reálom čase spracováva merania tak ako prichádzajú, oneskorenie je menej ako päť minút no výsledky majú najnižšiu presnosť. Veľmi dôležitá je aj metodika spracovania meraní. Pri sieťovom riešení vytvárame základnice medzi stanicami na základe ktorých následne dvojnásobne diferencujeme fázové merania medzi týmito stanicami. Tento prístup dokáže potlačiť niektoré nežiadúce efekty na minimum ako napríklad chyby hodín prijímača, chyby hodín satelitov, efekt ionosféry a mnohé ďalšie. Treba si ale uvedomiť, že ak sú merania ovplyvnené externými vplyvmi ako napríklad viac cestné šírenie sa signálu alebo zlyhaním zariadenia, tak sa tieto efekty prenesú cez základnice do výsledných parametrov spracovania celej siete. Pri bodovom riešení nevytvárame medzi stanicami základnice a využívame k určovaniu výsledných parametrov spracovania iba merania na danej stanici. Na dosiahnutie porovnateľných výsledkov so sieťovým riešením z pohľadu presnosti je potrebné zaviesť mnohé spomínané korekcie nežiadúcich efektov, ktoré sú dostupné po dvoch až troch týždňoch.

#### 2.1 Určovanie zenitového totálneho oneskorenia

Výpočet zenitového totálneho oneskorenia vykonávame každú hodinu pomocou Bernského softvéru v5.2 (Bern, 17. októbra 2017) s oneskorením 32 minút po skončení danej hodiny. Ide o sieťové riešenie s využitím dvojnásobne diferencovaných fázových meraní z družicových systémov GPS a GLONASS v takmer reálnom čase. Základnice medzi stanicami sú tvorené s ohľadom na počet spoločných observácií, pričom je zobraná do úvahy aj vzájomná vzdialenosť staníc. Využívané sú permanentné stanice GNSS na území Slovenska a z okolitých štátov, respektíve strednej Európy. Dokopy je spracovávaných 59 staníc a na všetkých týchto staniciach je určované zenitové totálne oneskorenie. Každú hodinu sú spracovávané merania za posledných osem hodín, čo nám dodáva potrebnú stabilitu výsledkov. Zahrnutie GLONASS observácií do spracovania nám znížilo strednú neistotu určenia ZTD o 10 až 15%. Všetky aktuálne a dostupné výsledky nájdete na stránke http://space.vm.stuba.sk/pwvgraph/, kde sú zobrazené ZTD a PWV vybraných staníc za posledné obdobie dvoch týždňov. Zobrazenie distribúcie permanentných GNSS staníc v okolí Slovenska je na obrázku 1, niekoľko staníc sa ešte nachádza v strednej Európe.

## 2.2 Analýza zenitového totálneho oneskorenia

Analýzu kvality určenia parametrov GNSS spracovania robíme v dvoch rovinách. Kontrolu určenia súradníc robíme výpočtom priemerných súradnicových rozdielov zo všetkých staníc v lokálnom topocentrickom systéme medzi našim a finálnym kombinovaným sieťovým EUREF riešením. Keď že EUREF riešenie je dostupné až po približne troch týždňoch aktuálne spracovania nie sú porovnávané. Priemerná odchýlka polohy za posledné obdobie v smere na sever je 0,91 mm, na východ je -0,20 mm a vo výške 5,96 mm. Taktiež porovnávame určenie ZTD na staniciach, ktoré sú spracovávané Medzinárodnou GNSS službou IGS metódou presného bodového riešenia. Jedná sa o stanice BUCU (Bukurešť, Rumunsko), GANP (Gánovce, Slovensko), GRAZ (Gratz, Rakúsko), WTZR (Wettzell, Nemecko) a ZIMM (Zimmerwald, Svajčiarsko). IGS finálne presné bodové riešenie je tiež dostupné po približne troch týždňoch. Na testovaných dátach v období od 4. augusta do 18. augusta 2017 bola na stanici GANP priemerná odchýlka medzi ZTD určeným v takmer reálnom čase sieťovým riešením a finálnym presným bodovým riešením -1,29 mm, štandardná odchýlka 6.22 mm a koeficient korelácie 0.988. Výsledky porovnania všetkých spomínaných staníc sa nachádzajú v tabuľke 1. Grafické zobrazenie porovnania ZTD pre stanicu GANP sa nachádza na obrázku 2, naše riešenie je označené skratkou STU. Rozdiely medzi riešeniami sú posunuté o +2150 mm.



Obr. 1: Zobrazenie umiestnenia permanentných GNSS staníc a AROME domény.

Tabulka 1. Statisticke udaje o fozdieločni ZTD medzi 165 a STO nesemm [mm].							
	BUCU	GANP	GRAZ	UZHL	WTZR	ZIMM	
Korelácia	+0,988	+0,988	+0,989	+0,990	+0,989	$+0,\!985$	
Minimum	-38,0	-33,8	-30,1	-18,7	-25,0	-23,0	
Maximum	$18,\! 6$	18,5	23,1	19,7	$16,\!6$	22,5	
Priemer	-2,13	-1,29	-1,26	-0,36	-0,59	$0,\!14$	
Štandardná odchýlka	6,08	6,22	$6,\!25$	$5,\!82$	5,92	5,78	

Tabuľka 1: Štatistické údaje o rozdieloch ZTD medzi IGS a STU riešením [mm]

Vzhľadom na to, že naše riešenie je v takmer reálnom čase je zhoda medzi riešeniami veľmi dobrá. Na porovnanie sme vybrali presné bodové riešenie, pretože boli použité tie isté merania na spomínaných staniciach ale metodika spracovania je rozdielna. Formálne chyby v meraniach sa neprenášajú medzi stanicami, pretože pri určovaní ZTD pomocou presného bodového riešenia nevytvárame záklanice medzi stanicami a nediferencujeme merania.

#### 2.3 Využitie zenitového totálneho oneskorenia

Vypočítané ZTD vizualizujeme do máp zenitových totálnych oneskorení na území Slovenska, tieto mapy sú deformované rozdielnymi nadmorskými výškami jednotlivých staníc.



Obr. 2: Porovnanie zenitového totálneho oneskorenia medzi IGS finálnym riešením a STU riešením v takmer reálnom čase.

Preto modelujeme ZTD medzi úrovňou hladiny mora a stanicou podľa Baueršíma (1983), následne ho pripočítavame k pôvodnému ZTD na stanici. Takýmto spôsobom minimalizujeme vplyv orografie na mapu zenitových totálnych oneskorení na území Slovenska. Výpočet výšky vodného stĺpca prebieha podľa spomínaného článku Bevis *et al.* (1994) a keďže na území Slovenska majú iba tri permanentné stanice GNSS priamo merané meteorologické parametre, využívame hodnoty teploty a tlaku z modelu ALADIN. Tieto údaje sú vztiahnuté k hladine mora pričom ich následne pomocou vertikálnych gradientov prepočítame do nadmorskej výšky danej permanentnej stanice. Takto transformované ALADIN meteorologické dáta ďalej používame na výpočet výšky vodného stĺpca nad permanentnou stanicou GNSS a zenitových totálnych oneskorení medzi hladinou mora a stanicou. Na rozdiel od ZTD, ktoré dosahuje hodnoty okolo 2400 mm, výška vodného stĺpca dosahuje na našom území priemerné hodnoty okolo 4–12 mm v závislosti od ročného obdobia.

## 3 Asimilácia zenitového totálneho oneskorenia do numerického predpovedného modelu počasia

Jednou z možností využitia zenitových totálnych oneskorení je asimilácia týchto informácii o atmosfére do numerického predpovedného modelu počasia (model). Na Slovenskom hydrometeorologickom ústave sa venujeme asimilácii ZTD dát šesťhodinovým cyklom pomocou trojrozmerného variačného systému (3D–var) (Fischer *et al.*, 2005) do modelu AROME (Seity *et al.*, 2011). AROME je nehydrostatický spektrálny numerický predpovedný model počasia na ohraničenej oblasti, ktorý je súčasťou globálneho modelu

IFS/ARPEGE (Courtier et al., 1991).

#### 3.1 Asimilácia dát

Cieľom asimilácie meraní ZTD je odhadnúť aktuálny stav počasia – analýzu, ktorá bude rešpektovať apriórny stav atmosféry a vektor observácií. Tento prístup je založený na minimalizácii kvadratickej formy J (Bouttier & Courtier, 2002)

$$J(\mathbf{x}) = (\mathbf{x} - \mathbf{x}_b)^T \mathbf{B}^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_b) + (\mathbf{y} - H(\mathbf{x}))^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{y} - H(\mathbf{x}))$$
  
=  $J_b + J_o$ , (1)

kde  $\mathbf{x}$  je analýza,  $\mathbf{x}_b$  je apriórny stav atmosféry (model),  $\mathbf{y}$  je vektor observácií, H je nelineárny observačný operátor,  $\mathbf{H}$  je linearizovaný observačný operátor,  $\mathbf{B}$  je kovariančná matica apriórneho stavu atmosféry a  $\mathbf{R}$  je kovariančná matica observácií. Hľadáme taký stav atmosféry – analýzu  $\mathbf{x}$  pri ktorej bude suma štvorcov odchýlok analýzy od apriórneho stavu atmosféry  $\mathbf{x}_b$  a od observácií  $\mathbf{y}$  minimálna. V princípe je možné asimilovať viacero typov dát naraz. V našich experimentoch sa jedná iba o zenitové totálne oneskorenie. Prírastky k apriórnemu stavu atmosféry vypočítame podľa

$$\mathbf{x} - \mathbf{x}_{b} = \left(\mathbf{B}^{-1} + \mathbf{H}^{-T}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H}\right)^{-1}\mathbf{H}^{-T}\mathbf{R}^{-1}\left(\mathbf{y} - H\left(\mathbf{x}_{b}\right)\right).$$
(2)

Zobrazenie umiestnenia domény je na obrázku 1 ohraničené modrou čiarou. Horizontálne rozlíšenie modelu je 2,5 km, pričom v zemepisnej dĺžke má model 500 bodov a zemepisnej šírke 320 bodov. Vertikálne je atmosféra v modeli AROME rozdelená na 60 modelových hladín. Ako prvé bolo nutné urobiť export ZTD do OBSOUL formátu, následne sme pre účely white list-u museli určiť odchýlky medzi modelom a zenitovými totálnymi oneskoreniami na všetkých staniciach v doméne. Ďalším krokom bolo zostavenie white list-u pre GNSS stanice, ktorý obsahuje statické systematické korekcie ZTD používané pri asimilačných štúdiách.

#### 3.2 Generovanie OBSOUL súborov

Generovanie OBSOUL súborov je automatizovane spúšťané po každom úspešnom GNSS spracovaní o 00,06,12 a 18 UTC. Údaje v OBSOUL súboroch sú vytvorené a naformátované podľa technického manuálu z Météo France (France, 2007). V OBSOUL súboroch sa nachádzajú všetky identifikátory merania potrebné pre BATOR a SCREENING, polohu v zemepisných súradniciach, dátum, čas merania a obdobie pre ktoré je merania platné, zenitové totálne oneskorenie a jeho neistotu určenia. Do súborov zaznamenávame všetky stanice bez akejkoľvek selekcie, tak aby sme boli schopní, v prípade zmeny domény, ihneď používať všetky stanice bez opätovného spracovania a bez ohľadu na ich polohu. Výhoda priameho generovania ZTD vo formáte OBSOUL je, že nie je potrebná žiadna ďalšia transformácia ako je to pri E–GVAP dátach.

# 3.3 Výpočet odchýlok medzi modelom a zenitovými totálnymi oneskoreniami

Určovanie odchýlok medzi modelom a ZTD (first-guess departures) sme robili pre dni od 01.09.2017 do 30.09.2017 pre časy 00,06,12 a 18 UTC. Prvou úlohou bola transformácia riadiaceho modelu ALADIN do modelu AROME. Túto transformáciu robíme pomocou troch krokov, v prvých dvoch krokoch transformujeme povrchové a pôdne veličiny pričom tretí krok nám zabezpečuje transformáciu atmosférických polí danej hodiny a nasledujúcich šiestich hodín. Po úspešnej transformácii geometrie riadiaceho modelu sme pristúpili k výpočtu šesťhodinovej predpovede s časovým krokom 90 sekúnd. Na výpočet odchýlok medzi modelom a ZTD používame šesť hodinovú predpoveď, aby sme sa čo najviac priblížili k implementácii operatívnej asimilácii dát do modelu, keďže na SHMÚ je šesťhodinový cyklus výpočtu predpovedného modelu počasia. Následne zenitové totálne oneskorenia na všetkých staniciach uložíme do databázy ODB (Observational DataBase), pričom ich považujeme za konvenčné observácie. V tomto kroku prebehne aj prvá selekcia staníc. Merania mimo domény nie sú uložené pre d'alšie spracovanie. Keď že ZTD ešte nie sú opravené o systematickú korekciu, dáta budú zamietnuté pre asimiláciu. Vyprodukovanú databázu meraní ODB použijeme spolu so šesťhodinovou predpoveďou modelu ako vstup pre kontrolu kvality observácii (SCREENING). Posudzovaná je napríklad kompletnosť vstupov, poloha, redundantnosť, neistota observácii, veľkosť odchýlok od modelu a mnohé ďalšie. V ideálnom prípade získame 120 odchýlok medzi modelom a zenitovými totálnymi oneskoreniami pre každú stanicu.

## 3.4 Zostavenie white list-u

Zostavenie white list-u prebehlo pomocou programu SELECT\_GPSSOL na základe vypočítaných odchýlok ZTD od modelu. Jeho účelom je zostavenie zoznamu spoľahlivých staníc a výpočet statických systematických korekcií ZTD pre tieto stanice. Pomocou týchto korekcií je ZTD opravené a následná kontrola kvality umožní ďalšiu asimiláciu ZTD do modelu. Pri zostavovaní sa zohľadňujú tieto kritériá: či stanica dodáva kvalitné dáta dostatočne pravidelne a nachádza sa aspoň v 40% spracovaní ZTD, či majú odchýlky ZTD od modelu normálne rozdelenie pravdepodobnosti, či sú ZTD platné pre rovnaký časový interval, či sú rozdiely výšky modelovej orografie a nadmorskej výšky permanentnej stanice GNSS v dovolenej tolerancií 300 m. Kontrolované je, či vzájomná vzdialenosť staníc je aspoň 10 km, či sa stanica nachádza v doméne, či rozdiel určených nadmorských výšok stanice neprekročil 10 cm. Ak je stanica spracovávaná rôznymi analyzačnými centrami je zvolené centrum s najväčšou kvalitou a stabilitou výsledkov. Statická systematická korekcia a štandardná neistota určenia ZTD v dovolenom intervale môže byť maximálne 40 mm. Z celkového počtu 53 staníc v doméne bolo úspešne zaradených 52 staníc do white list-u. Stanica Kamenica nad Cirochou (KAME) bola vyradená pre časté výpadky, nachádzala sa iba v 33% spracovaní ZTD. Priemerná korekcia ZTD z white list-u je 0.0043 m, minimálnu korekciu -0.0011 m má stanica Cercivento (ZOUF), ktorá sa nachádza na severnej časti Talianska v Alpách s nadmorskou výškou 1897 m n.m.. Maximálnu korekciu 0.0097 m sme zaznamenali na stanici Hurbanovo (HUVO).

#### 3.5 Asimilácia meraní do modelu

Po úspešnom zostavení white list-u sme pristúpili k samotnej asimilácii dát do modelu. Najskôr opravíme naše ZTD o statické systematické korekcie v kroku BATOR pomocou programu PREGPSSOL. Takto opravené ZTD sa následne považujú už za korektné a v SCREENING-u budú označené pre ďalšie spracovanie. Ako apriórny stav atmosféry je používaná transformovaná šesťhodinová predpoveď z predchádzajúceho spracovania modelu. Následne prebehne CANARI a MINIM. CANARI má za úlohu vykonať analýzu pôdnych a povrchových parametrov modelu pomocou metódy optimálnej interpolácie (France, 2002). Na analýzu atmosférických parametrov používame metodiku minimalizácie kvadratickej funkcie podľa úvodu state 3. Technickú štúdiu sme vykonali na postupujúcom fronte zo západu z dňa 2.10.2017, ktorý sa postupne nasunul na naše územie zo severozápadu. Ako prvú sme urobili šesťhodinovú predpoveď rovnako ako v stati 3.3 pre dátum 3.10.2017 00UTC, do ktorej sme následne asimilovali ZTD. Zobrazenie inkrementov špecifickej vlhkosti je na obrázku 3. Inkrementy sme vo všetkých prípadoch počítali ako rozdiel medzi apriórnym stavom atmosféry a analýzou.



Obr. 3: Inkrementy špecifickej vlhkosti  $[\rm g\,kg^{-1}]$ analýzy z 3.10.2017 00UTC v 50-tej modelovej hladine.

Na obrázku 3 je zreteľné v ktorých miestach došlo k asimilácii ZTD do modelu. Červené oblasti nám vyjadrujú úbytok špecifickej vlhkosti v analýze voči apriórnemu stavu atmosféry v danej modelovej hladine. Maximálny úbytok dosahuje hodnotu  $4.43 \text{ g kg}^{-1}$ , pričom maximálny prírastok (modré oblasti) dosahuje hodnotu  $-6.89 \text{ g kg}^{-1}$ , priemerná zmena v celej doméne je  $-0.077 \text{ g kg}^{-1}$ . Zobrazeniu vertikálnych rezov atmosférou medzi stanicami SKSE a PEMB je na obrázkoch 4 a 5, pričom sme sa zamerali na špecifickú vlhkosť a teplotu. Šedou farbou je zobrazený vertikálny rez terénom, na osi y je vynesená výška atmosféry v metroch a na osi x sú zobrazené jednotlivé staničenia vertikálneho rezu

v kilometroch.



Obr. 4: Inkrementy špecifickej vlhkosti  $[g kg^{-1}]$  analýzy z 3.10.2017 00UTC vo vertikálnom reze medzi stanicami SKSE a PEMB.



Obr. 5: Inkrementy teploty [°C] analýzy z 3.10.2017 00UTC vo vertikálnom reze medzi stanicami SKSE a PEMB.

Z obrázku 5 je zrejmé, že došlo k zníženiu teploty v blízkom okolí stanice SKSE, na rozdiel od stanice PEMB. Taktiež môžeme pozorovať, že maximálne inkrementy v špecifickej vlhkosti sa nachádzajú približne vo výške približne 2000 metrov nad stanicou (obrázok 4). Ďalším krokom posudzovania asimilácie bolo posúdenie dopadu asimilácie na trojhodinové akumulované zrážky. Na obrázkoch je 6,7 a 8 sú zobrazené v ľavom hornom rohu predpovede akumulovaných zrážok apriórneho modelu atmosféry (bez asimilovaných dát), v pravom hornom rohu sú predpovede akumulovaných zrážok modelu s asimilovanými ZTD, v ľavom dolnom rohu sú rozdiely medzi predpoveďami a v pravom dolnom rohu je INCA analýza zrážok pre to isté obdobie. Rozdiel sme robili medzi predpoveďou bez asimilácie dát a predpoveďou s asimilovanými ZTD, čo znamená, že červené oblasti indikujú úbytok zrážok nad daným územím.



Obr. 6: Predpoveď akumulovaných zrážok $[\rm mm]$ z 3.10.2017 <br/>00UTC od 00 do 03.



Obr. 7: Predpoveď akumulovaných zrážok $[\rm mm]$ z 3.10.2017 <br/>00UTC od 03 do 06.



Obr. 8: Predpoveď akumulovaných zrážok [mm] z 3.10.2017 00UTC od 06 do 09.

Najväčší dopad na predpoveď akumulovaných zrážok sme zaznamenali prvých šesť hodín od termínu asimilácie, pre ďalšie termíny je už príspevok asimilácie nejednoznačný a stráca sa dopad na predpoveď. Efekt zmeny počiatočných podmienok sa s narastajúcim časom od asimilácie zmenšuje, pretože sa stáva viac dominantnejší vplyv okrajových podmienok riadiaceho modelu. K maximálnemu poklesu akumulovaných zrážok o 2,9 mm voči apriórnemu modelu došlo v prvých troch hodinách predpovede. Ďalšie štatistické údaje sa nachádzajú v tabuľke 2.

rasaina =. Statisticne adaje e rei	41010 011 0			
Obdobie akumulovaných zrážok	00 - 03	03 - 06	06 - 09	09 - 12
Minimum	-0,8	-1,0	-2,1	-2,2
Maximum	2,9	$^{2,0}$	2,0	$^{2,2}$
Priemer	$0,\!16$	$0,\!18$	$0,\!15$	$0,\!13$
Štandardná odchýlka	$0,\!14$	$0,\!10$	0,06	0,08

Tabuľka 2: Štatistické údaje o rozdieloch akumulovaných zrážok [mm].

Ako je v predchádzajúcej tabuľke a v obrázkoch 6 až 8 vidieť, došlo počas prvých deviatich hodín k celkovému zmenšeniu akumulovaných zrážok. S postupom času sa absolútne hodnoty maxím nárastu (modré oblasti) a úbytku (červené oblasti) akumulovaných zrážok vyrovnali. Štandardná odchýlka rozdielov klesla no priemerná hodnota zostala približne zachovaná, respektíve pozvoľne klesá. Z toho usudzujeme, že úbytok množstva zrážok ostal v priebehu deviatich hodín predpovede zachovaný len bol rovnomernejšie rozdistribuovaný nad celý front.

## 4 Záver

Na Katedre geodetických základov sa venujeme určovaniu zenitového totálneho oneskorenia pomocou sieťového riešenia využitím dvojnásobne diferencovaných fázových meraní. Spracovanie je v takmer reálom čase a prebieha každú hodinu, pričom spracovávame 53 staníc na území Slovenska a v jeho okolí. Naše výsledky priebežne validujeme s finálnymi riešeniami služieb EUREF a IGS. Súradnice porovnávame s kombinovaným EUREF riešením, pričom odchýlky polohy v lokálnom topocentrickom systéme sa v smere na sever a na východ pohybujú v intervale -2 do 2 mm a vo výške je to od 3 do 6 mm. Zenitové totálne oneskorenie porovnávame na základe finálneho IGS riešenia, ktoré je určované metódou presného bodového riešenia. Všetky výsledky porovnania permanentných staníc sa nachádzajú v tabuľke 1. Treba si uvedomiť, že finálne riešenie má oneskorenie niekoľko týždňov pretože je závislé na finálnych polohách družíc, parametrov orientácie Zeme, korekcie hodín atď. Grafické porovnanie ZTD na stanici GANP medzi finálnym riešením a riešením v takmer reálom čase je na obrázku 2. Z porovnaní usudzujeme, že naše riešenie je vzhľadom na požiadavku dostupnosti vo veľmi dobrej zhode s finálnymi riešeniami EUREF/IGS. V ďalšej fáze sme sa venovali zostaveniu white list-u pre potreby 3D-var asimilácie ZTD do modelu AROME. Úspešne bolo zaradených 52 staníc do white list-u a bola im určená statická systematická korekcia, ktorá slúži na opravu vstupujúcich ZTD do asimilácie. Na obrázku 3 sú zobrazené rozdiely špecifickej vlhkosti medzi počiatočným stavom a analýzou 3.10.2017 18UTC v 50-tej modelovej hladine. Táto zmena počiatočných podmienok sa prejavila do nasledujúcich predpovedí akumulovaných zrážok, ako je zobrazené na obrázkoch 6 až 8. Bližší pohľad na štatistické údaje o trojhodinových akumulovaných predpovediach sa nachádzajú v tabuľke 2. Dopad na predpoveď akumulovaných zrážok je najvýraznejšia prvých šesť hodín od termínu asimilácie, pre neskoršie termíny je už príspevok asimilácie potlačený okrajovými podmienkami riadiaceho modelu. V budúcnosti sa chceme venovať cyklickej asimilácii dát do modelu, čo znamená, že šesťhodinová predpoveď modelu s asimilovanými dátami bude vystupovať ako apriórny model pre ďalší asimilačný cyklus. Tento prístup by mal napomôcť k spresneniu predpovedných vlastností modelu, a plánujeme ho v dohľadnej dobe implementovať. Taktiež chceme využívať variačnú systematickú korekciu ZTD, ktorá bude zohľadňovať sezónne zmeny počasia ako aj systematické zhoršenie kvality ZTD.

## Literatúra

- Baueršíma, I. 1983. NAVSTAR/Global Positioning System (GPS), II. Mitteilungen der Satelliten-Beobachtungsstation Zimmerwald, 10.
- Bern, Universität. 17. októbra 2017. Bernese GPS Software Version 5.2. bernese.unibe.ch/docs/DOCU52.pdf.
- Bevis, M., Businger, S., Chiswell, S., Herring, T. A., Anthes, R. A., Rocken, C., & Ware,
  R. H. 1994. GPS Meteorology: Mapping Zenith Wet Delays onto Precipitable Water.
  Jurnal of Applied Meteorology, 33, 379–386. Addison Wesley, Massachusetts.

Böhm, J., Niell, A. E., Tregoning, P., & Schuh, H. 2006a. Global Mapping Function: A

new empirical mapping function based on numerical weather model data. *Geophysical Research Letterss*, **33**.

- Bouttier, F., & Courtier, P. 2002. Data assimilation concepts and methods. *Meteorological Training Course Lecture Series*, 59.
- Courtier, P.and Freydier, C., Geleyn, J.-F., Rabier, F., & Rochas, M. 1991. The ARPEGE project at Météo-France. ECMWF, Shinfield Park, Reading.
- Davis, J., Herring, T., Shapiro, I., Rogers, A., & Elgered, G. 1985. Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length, Radio science. *Radio science*, **20**(1593–1607).
- Fischer, C., Montmerle, T., Berre, L., Auger, L., & Stefanescu, S. E. 2005. An overview of the variational assimilation in the ALADIN/France NWP system. *Quarterly Journal* of the Royal Meteorological Society, 131, 3477–3492.
- France, Météo. 2002. Optimal interpolation : CANARI. umr-cnrm.fr/gmapdoc/spip.php?article3&var\_recherche=canari&var\_lang=en.
- France, Météo. 2007. Entrée de données de délais zénithaux GPS sol dans AR-PEGE/ALADIN/AROME. umr-cnrm.fr/gmapdoc/IMG/pdf\_gpssol\_procedure\_entree\_4.pdf.
- Seity, Y., Brousseau, P., Malardel, S., Hello, G., & Bénard, P. 2011. The AROME-France convective-scale operational model. *Monthly Weather Review*, **139**, 976–991.