

Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta

Ing. Michal Mikolaj

Autoreferát dizertačnej práce

**VPLYV VARIÁCIE HYDROLOGICKÝCH HMÔT
NA GRAVIMETRICKÉ MERANIA**

na získanie akademického titulu doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe: 3636 geodézia a kartografia

Bratislava 2013

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Katedre geodetických základov Stavebnej fakulty Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

Predkladateľ: Ing. Michal Mikolaj
Katedra geodetických základov
Stavebná fakulta, STU v Bratislave
Radlinského 11, 813 68 Bratislava

Školiteľ: doc. Ing. Marcel Mojzeš, PhD.
Katedra geodetických základov
Stavebná fakulta, STU v Bratislave
Radlinského 11, 813 68 Bratislava

Oponenti: prof. Ing. Andrej Šoltész, PhD.
Katedra hydrotechniky
Stavebná fakulta, STU v Bratislave
Radlinského 11, 813 68 Bratislava

prof. RNDr. Igor Mucha, DrSc.
Konzultačná skupina Podzemná voda, spol. s r.o.
Kolískova 1, 841 05 Bratislava 4

Ing. Vojtech Pálinkáš, PhD.
Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický, v.v.i.
Geodetická observatoň Pecný
Ondřejov 244, 251 65 Ondřejov

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná
na Katedre geodetických základov SvF, STU v Bratislave, Radlinského 11, 813 68 Bratislava

.....
Prof. Ing. Alojz Kopáčík, PhD
dekan Stavebnej fakulty STU
Radlinského 11, 813 68 Bratislava

Obsah

1 Úvod	1
2 Ciele dizertačnej práce	2
3 Súčasný stav riešenej problematiky	2
4 Metodika práce a metódy skúmania - numerický experiment	5
4.1 Korekcia meraní supravodivého gravimetra	6
4.1.1 Conrad	6
4.1.2 Viedeň	8
4.1.3 Pecný	12
4.1 Absolútne gravimetrické merania na Slovensku	15
5 Prínos pre vedu a prax	18
6 Záver	19
Summary	20
Literatúra	21
Zoznam publikovaných prác z danej problematiky	22

1 Úvod

Gravimetria sa zaoberá meraním tiažového zrýchlenia, ktoré možno definovať ako súčet gravitačného a odstredivého zrýchlenia. To umožňuje využitie meraných hodnôt tiažového zrýchlenia v rôznych vedných disciplínach. V geodézii a geofyzike sa gravimetrické merania využívajú na určenie geometrických a fyzikálnych vlastností Zeme. Pod geometriou si možno predstaviť nielen polohu bodu, ale aj jej zmenu v čase. Práve v súvislosti s polohou bodu a jej zmenou sú presné gravimetrické merania využívané v geodézii najčastejšie. Vychádza sa z Newtonovho gravitačného zákona, podľa ktorého bude gravitačné zrýchlenie klesať s narastajúcou vzdialenosťou od Zeme. Gravimetrické merania sa využívajú na doplnenie meraní globálnych navigačných družicových systémov, ktorých presnosť vo vertikálnom smere neumožňuje sledovať zmeny na úrovni milimetrov. Najpresnejšie prístroje na meranie tiažového zrýchlenia v podobe supravodivých gravimetrov dosahujú presnosť $1 \text{ nm}\cdot\text{s}^{-2}$ ($10^{-9} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$) (Hinderer a kol., 2007). Vzhľadom na pokles tiažového zrýchlenia s výškou vo voľnom vzduchu to odpovedá presnosti približne 0.3 mm. Z tohto dôvodu sú gravimetrické merania využívané na monitorovanie tektonických pohybov, či postglaciálneho zdvihu. Tento spôsob interpretácie však vyžaduje odstránenie všetkých variácií nesúvisiacich so zmenou výšky. Jedným z vplyvov je aj hydrologická variácia.

Hydrosféra vnáša do meraní z pohľadu geodézie neželaný šum. Hydrosféra ovplyvňuje krátkodobú, ako aj dlhodobú zložku variácie tiažového zrýchlenia, pričom amplitúdou táto variácia niekoľkonásobne prevyšuje presnosť gravimetrov. Je ľahké si predstaviť, že najväčšie presuny hmôt v okolí merania majú hydrologický pôvod. Ako príklad možno uviesť variáciu vlhkosti pôdy a hladiny podzemnej vody. Nejedná sa len o obdobia s výraznými zmenami hydrologických pomerov, akými sú záplavy, ale o každodenné presuny spojené s hydrologickým cyklom. Pre predstavu, zmenu tiažového zrýchlenia o $1 \text{ nm}\cdot\text{s}^{-2}$ vyvolá naplnenie gule vodou s polomerom 1 meter a stredom vo vzdialenosti 16.7 m.

Cieľom pri spracovaní gravimetrických meraní je identifikovať variáciu tiažového zrýchlenia súvisiacu s hydrosférou a túto variáciu následne odstrániť. Doposiaľ neexistuje jednotná stratégia pri výpočte hydrologických korekcií. Jedným z dôvodov je vysoká náročnosť na vstupné údaje v podobe presného digitálneho modelu reliéfu, hydrogeologického prieskumu danej lokality a v neposlednom rade hydro–meteorologických meraní. Cieľom práce je analyzovať rôzne postupy výpočtu hydrologickej korekcie a tieto postupy následne aplikovať na dostupné gravimetrické merania.

Presné gravimetrické merania nájdu uplatnenie nielen v geodézii, ale aj pri študovaní procesov Zeme, akými sú interakcie medzi plášťom a jadrom, zmeny v rotácii alebo pri analýze zemetrasení. Porozumenie jedného z procesov, akým je vplyv hydrosféry na tiažové zrýchlenie, tak znamená posun vo všetkých oblastiach. Úloha sa dá obrátiť a tiažové zrýchlenie možno využiť v oblasti hydrológie, napr. pri overení vytvoreného hydrologického modelu. V geodézii prispeje úspešné odstránenie vplyvu hydrosféry na tiažové zrýchlenie ku korektnej interpretácii gravimetrických meraní.

2 Ciele dizertačnej práce

Hlavným cieľom dizertačnej práce je analýza vplyvu variácie hydrologických hmôt na terestrické gravimetrické merania a jeho efektívna eliminácia z dostupných meraní. Vytvorený model výpočtu hydrologických korekcií má za úlohu minimalizovať vplyv hydrosféry v globálnej, ako aj lokálnej mierke, takým spôsobom, aby bolo možné redukované tiažové zrýchlenie využiť na ďalšiu interpretáciu v oblasti geodézie.

Špecifické ciele:

1. Analýza súčasného stavu spracovania a interpretácie terestrických gravimetrických meraní.
 - (a) Opis súčasnej meracej techniky využívanej na presné meranie tiažového zrýchlenia.
 - (b) Opis prípravy nameraných údajov na ďalšie spracovanie.
 - (c) Opis súčasného stavu riešenej problematiky.
2. Opis jednotlivých efektov pôsobiacich na gravimetrické merania a analýza výsledkov meraní so zameraním na atmosférické a hydrologické vplyvy.
 - (a) Opis a analýza hlavných vplyvov na variáciu tiažového zrýchlenia v čase.
 - (b) Analýza atmosférickej korekcie.
 - (c) Analýza hydrologických vplyvov na tiažové zrýchlenie.
3. Možnosti monitorovania hydrologických parametrov a využitie hydrologických modelov v oblasti gravimetrie.
 - (a) Opis meraných parametrov v oblasti hydrológie a ich využitie v študovanej lokalite.
 - (b) Opis a analýza dostupných globálnych hydrologických modelov.
4. Návrh modelu na efektívne spracovanie gravimetrických meraní s ohľadom na vplyv hydrosféry a zhodnotenie dosiahnutých výsledkov.
 - (a) Vytvorenie modelu na výpočet hydrologických korekcií umožňujúci aplikáciu takéhoto modelu na miesta so súbežným meraním tiažového zrýchlenia a hydro–meteorologických parametrov.
 - (b) Analýza vhodnosti vytvoreného modelu prostredníctvom výpočtu hydrologických korekcií v miestach s meraným tiažovým zrýchlením supravodivým a absolútnym gravimetrom.
 - (c) Zhodnotenie dosiahnutých výsledkov.

3 Súčasný stav riešenej problematiky

Na meranie tiažového zrýchlenia sa využívajú gravimetre. Tie možno deliť v závislosti na princípe merania na absolútne a relatívne. Absolútnu hodnotu veľkosti vektora tiažového zrýchlenia možno určiť absolútnym gravimetrom (AG). V súčasnosti najrozšírenejším a zároveň najpresnejším AG je gravimeter s označením FG5. Pri opakovaných meraniach vykonaných rovnakým AG na jednom mieste je dôležitá informácia o reprodukovateľnosti. Tá je podľa (JCGM, 2008) definovaná ako miera zhody medzi meraniami vykonanými rovnakým gravimetrom v rôznych

podmienkach. Reprodukovanosť je pre gravimeter FG5 č. 215, ktorý sa používa na absolútne gravimetrické merania v rámci Slovenskej republiky, odhadnutá na $8 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$ (Pálinkáš a kol., 2012). Táto hodnota nezahŕňa chyby v určení štandardných korekcií. Po zahrnutí tohto vplyvu sa hodnota reprodukovanosti odhadnutá v uvedenom článku zvýši na $11 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$.

Relatívne gravimetre určujú rozdiel tiažového zrýchlenia medzi bodmi. Špeciálnym prípadom relatívnych gravimetrov sú supravodivé gravimetre (SG), ktoré slúžia na kontinuálny záznam zmien tiažového zrýchlenia v čase na jednom mieste. Ako bolo spomenuté v úvode, presnosť týchto gravimetrov sa pohybuje na úrovni $1 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$. Táto hodnota nezahŕňa vplyv neistoty zavádzaných korekcií a možné rozdiely vo výsledkoch pri spracovaní rovnakého signálu rôznymi operátormi. Celkovo však možno povedať, že SG dosahujú vyššiu presnosť a časové rozlíšenie než AG. Nevýhodou SG je jeho chod.

Aby bolo možné merané tiažové zrýchlenie (g) využiť pri štúdiu tektonických pohybov, ako aj ďalších javov, je potrebné z meraní odstrániť nežiaduce vplyvy. V súčasnosti sa z meraní odstraňujú účinky nebeských telies (δg_{slapy}), zmeny polohy pólu (δg_{pol}), atmosféry (δg_{atmo}) a v prípade SG aj chod. Tieto korekcie možno nazvať štandardnými korekciami a po ich aplikácii vzniká reziduálny časový rad (δg_{psk}) (vzorec (1)).

$$g_{psk} = g + \delta g_{slapy} + \delta g_{atmo} + \delta g_{pol} + chod \quad (1)$$

Z hľadiska presnosti výpočtu štandardných korekcií sa najväčšia neistota viaže s atmosférickou korekciou. Z tohto dôvodu bola okrem hydrologickej variácie zvýšená pozornosť venovaná aj atmosférickej korekcii. Pri jej výpočte možno použiť numerický alebo fyzikálny prístup. Fyzikálny prístup výpočtu atmosférickej korekcie využíva modelované pohyby atmosférických hmôt, ktorých účinky na tiažové zrýchlenie sa určia aproximáciou týchto hmôt jednoduchými tvarmi so známym vzorcom (napr. bod alebo kužeľ). Numerická metóda je založená na odhade regresného parametra popisujúceho zmenu tiažového zrýchlenia so zmenou tlaku. Z dosiahnutých výsledkov vyplýva, že pri korekcii presných gravimetrických meraní je nutné brať do úvahy vplyv atmosféry v celosvetovej mierke. Použitie regresného parametra na výpočet atmosférickej korekcie je nevyhovujúce. Odporúča sa použiť kombinácia fyzikálneho (pre globálnu časť) a numerického (pre lokálnu časť) postupu výpočtu atmosférickej korekcie, prípadne len fyzikálneho postupu. Z tohto dôvodu boli na ďalšie výpočty použité výsledky fyzikálneho prístupu založeného na modeli Atmacs (Klügel a Wziontek, 2009).

Problémom pri výpočte hydrologických korekcií je neexistujúci metodický návod ich výpočtu. Pri štandardných korekciách sa vychádza z rezolúcie IAG, prípadne iných konvencií. V porovnaní so štandardnými korekciami vyžaduje hydrologická korekcia väčší počet vstupných údajov, ktoré nepatria nevyhnutne medzi merané veličiny. V ideálnom prípade je pri výpočte lokálnej hydrologickej korekcie zohľadnený detailný digitálny model reliéfu (DMR), hydrogeologický prieskum, vlhkosť pôdy (VP), hladina podzemnej vody (HPV), výška a hustota snehu, prípadne variácia blízkych povrchových vodných útvarov a úhrny zrážok. Zavádzanie hydrologickej korekcie tak nie je komplikované len z hľadiska použitých matematických postupov, ale aj z hľadiska finančnej náročnosti pri budovaní observatória slúžiaceho na pozorovanie variácie tiažového zrýchlenia. Pri výpočte hydrologických vplyvov možno okrem lokálnych meraní využiť globálne hydrologické modely. Pod globálnymi hydrologickými modelmi (GHM) rozumieme modely poskytujúce informácie o množstve vody pre body na všetkých kontinentoch. Výnimkou je Antarktída, nakoľko sa jedná o oblasť trvalo pokrytú ľadom. Z tohto dôvodu nie je Antarktída do GHM zahrnutá. Zároveň poskytovatelia modelov neodporúčajú používať hodnoty množstva vody pre Grónsko z dôvodu nedostupnosti spoľahlivých údajov v tomto území. Samozrejmom podmienkou pri výbere globálneho modelu bola v dizertačnej práci dostupnosť. Z tohto dôvodu

boli v numerickom experimente použité GHM Global Land Data Assimilation System (GLDAS) (Rodell a kol., 2004) a WaterGAP Global Hydrology Model (WGHM) (Döll a kol., 2003). Model GLDAS sa v závislosti na použítom modeli zemského povrchu delí na štyri verzie: CLM, MOS, NOAH a VIC. Model pracuje vo všetkých verziách s rovnakými vstupnými údajmi. Zdrojom meteorologických údajov sú terestrické a družicové merania. Výstupy z jednotlivých verzií modelu GLDAS sa líšia rôznym priestorovým rozlíšením, ako aj rozličnými vrstvami. Pod rozličnými vrstvami sa rozumejú rôzne úrovne vlhkosti pôdy. Vo všetkých prípadoch sú dostupné údaje s trojhodinovým alebo mesačným krokom. Celkové množstvo vody v danom bode je súčtom vlhkosti pôdy, snehu a množstva vody zachytenej vo vegetácii. Celkové množstvo vody je v prípade modelu WGHM tvorené vlhkosťou pôdy, podzemnou vodou, snehom, vodou zadržanou vegetáciou, ako aj povrchovou vodou. Z tohto hľadiska poskytuje model WGHM v porovnaní s GLDAS komplexnejšiu informáciu. Nevýhodou je, že údaje v modeli sú dané priamo ako súčet jednotlivých vrstiev. Model WGHM v porovnaní s GLDAS pracuje na inom princípe, kde modelované hodnoty sú konfrontované s globálnou sieťou meraných prietokov, zatiaľ čo pri modeli GLDAS sú jednotlivé modelované parametre konfrontované s im odpovedajúcimi meranými hodnotami. Údaje pre WGHM sú poskytované s mesačným krokom. Informácie o uvedených modeloch sú zhrnuté v tabuľke 1.

Tabuľka 1: Najdôležitejšie informácie o použitých (dostupných) modeloch GLDAS a WGHM z pohľadu výpočtu hydrologických korekcií (Fang a Won, 2009, Döll a kol., 2003)

model	rozlíšenie	krok	od	do	VP (m)	HPV	sneh	povrch	vegetácia
CLM	1.00°	3 hodiny/mesiac	1979	2013	0-3.433	×	✓	×	✓
MOS	1.00°	3 hodiny/mesiac	1979	2013	0-3.5	×	✓	×	✓
NOAH	1.00°	3 hodiny/mesiac	1979	2013	0-2.0	×	✓	×	✓
NOAH	0.25°	3 hodiny/mesiac	2000	2013	0-2.0	×	✓	×	✓
VIC	1.00°	3 hodiny/mesiac	1979	2013	0-1.9	×	✓	×	×
WGHM	0.50°	mesiac	2000	2007	✓	✓	✓	✓	✓

Medzi prvé práce zaoberajúce sa hydrologickými vplyvmi na tiažové zrýchlenie patrí príspevok (Lambert a Beaumont, 1977), kde je analyzovaný vplyv variácie hladiny podzemnej vody na merania vykonané relatívnymi gravimetrami. Článok naznačil, akým spôsobom vplýva hydrosféra na terestrické gravimetrické merania a môže nepriaznivo ovplyvniť merania vykonané s cieľom sledovania tektonických pohybov. Spoločným ukazovateľom článkov zameraných na výpočet hydrologických účinkov je rozdelenie vplyvu hydrosféry na globálny a lokálny vplyv. Z fyzikálneho hľadiska nemá toto delenie význam, avšak z hľadiska postupu výpočtu je vhodné toto delenie zavádzať. Pre lokálnu zónu sa spravidla používajú detailnejšie modely a pre globálnu zónu modely s vyšším stupňom aproximácie. Vplyv hydrosféry na terestrické gravimetrické merania môžeme rozdeliť na krátkodobý a dlhoperiodický. Rýchle zmeny tiažového zrýchlenia súvisia s lokálnymi vplyvmi, zatiaľ čo dlhoperiodické vplyvy sú kombináciou lokálnych a globálnych vplyvov. Z fyzikálneho hľadiska možno vplyv hydrosféry rozdeliť na priamy a nepriamy (deformačný) vplyv. Pod priamym vplyvom sa rozumejú gravitačné účinky hydrologických hmôt. Tie vyplývajú z Newtonovho gravitačného zákona. Nepriame účinky vyplývajú zo zmeny výšky bodu v dôsledku deformácie vyvolanej hydrologickými hmotami a z účinkov narušeného hustotného poľa.

4 Metodika práce a metódy skúmania - numerický experiment

Kapitola sa venuje analýze vplyvu jednotlivých častí hydrosféry na tiažové zrýchlenie a následnému výpočtu korekcií minimalizujúcich tieto vplyvy. Analyzovaná bola vhodnosť jednotlivých matematických postupov, ako aj vplyv rôznych vstupných údajov na výslednú hodnotu korekcie. Vytvorený model výpočtu hydrologických korekcií bol následne aplikovaný na dostupné merania absolútneho a supravodivého gravimetra. Využité boli merania SG zo staníc Conrad (Rakúsko), Viedeň (Rakúsko) a Pecný (Česká republika). Pri analýze meraní AG bola pozornosť venovaná bodom Štátnej gravimetrickej siete Gánovce, Liesek, Modra a Skalnaté Pleso. Podobne ako v prípade atmosféry možno výpočet podľa prístupu rozdeliť na numerický a fyzikálny. Fyzikálny prístup bol aplikovaný na všetky stanice. Numerický prístup bol testovaný na stanici Pecný.

Ako globálny bol označený vplyv presunov hydrologických hmôt pre body vo sférickej vzdialenosti (ψ) viac ako 0.1° od miesta pozorovania. Výpočet priameho gravitačného (g^N) a nepriameho deformačného vplyvu (g^E) bol realizovaný pomocou vzorcov (2) až (4) (Farrell, 1972). Symboly h_n , k_n reprezentujú deformačné koeficienty, M je hmotnosť Zeme a $P_n(\cos \psi)$ Legendrov polynóm 1. druhu stupňa n . Jedná sa o sféricú aproximáciu, kde výslednú korekciu dostaneme vynásobením spomínaných vzorcov hmotnosťou bodu. V prípade bodu vo vysokohorskom prostredí je miesto sférickej aproximácie potrebné do výpočtu zakomponovať DMR. Vplyv zmeny hranice medzi lokálnou a globálnou korekciou bol analyzovaný na stanici Pecný, kde bolo dokázané, že výrazný posun hranice (na 0.2° , resp. na 0.003°) ovplyvní štandardnú odchýlku variácie tiažového zrýchlenia po hydrologickej korekcii v minimálnej miere. Globálna hydrologická korekcia (GHK) bola určená na základe hydrologického modelu GLDAS/NOAH každých 24 hodín. Model GLDAS/NOAH bol zvolený na základe porovnania štandardných odchýlok od priemerných hodnôt GHK určených zo všetkých dostupných modelov (SD_{GHK} , tab. 2). Testovaný bol vplyv časového a priestorového rozlíšenia na výslednú hodnotu GHK. Bolo dokázané, že zvýšenie časového rozlíšenia na 3 hodiny ovplyvní výslednú korekciu v zanedbateľnej miere. Rozdiel GHK určenej z denného a mesačného modelu GLDAS/NOAH je do $5 \text{ nm}\cdot\text{s}^{-2}$. Časové rozlíšenie modelu zohráva pri výpočte GHK dôležitejšiu úlohu než priestorové rozlíšenie, čo bolo demonštrované pomocou modelu GLDAS/NOAH s rozlíšením 0.25° , resp. 1.0° . Opakované absolútne gravimetrické merania sa na Slovensku vykonávajú ročne v rovnakom časovom období. Dôvodom je minimalizácia vplyvu variácie hydrosféry v globálnej mierke. Predpokladom je, že GHK má v celom priebehu rovnakú periódu a amplitúdu. Z tohto dôvodu bola vykonaná časovo-frekvenčná analýza GHK a zistená variácia amplitúdy, ako aj periódy GHK v čase. Z výpočtu vyplýva, že opakované merania vykonané v rovnakom ročnom období je potrebné opraviť o GHK.

$$g^{N+E}(\psi) = \frac{g}{M} \sum_{n=0}^{\infty} [n + 2h_n - (n + 1)k_n] P_n(\cos \psi). \quad (2)$$

$$g^N(\psi) = -\frac{g}{4M \sin(\psi/2)}. \quad (3)$$

$$g^E(\psi) = g^{N+E}(\psi) - g^N(\psi). \quad (4)$$

Pri fyzikálnom prístupe výpočtu lokálnej korekcie (do približne 11.1 km) zohráva najvýznamnejšiu úlohu priebeh topografie. Do úvahy je zároveň nutné brať miesta, na ktorých nedochádza k variácii hydrologických hmôt, ako napr. v mieste budovy, či najbližších vrstvách

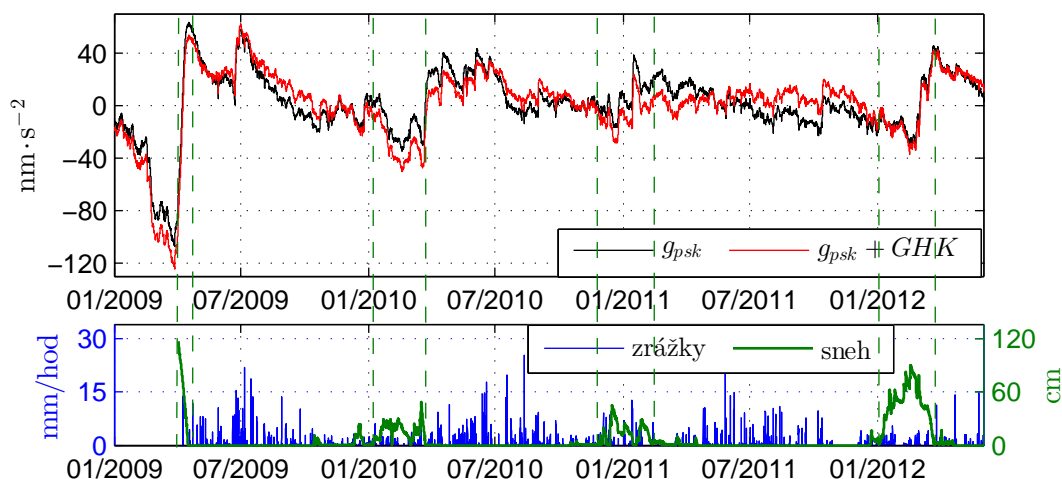
pod parkoviskom a cestou. Na výpočet priamych gravitačných účinkov boli použité vzorce na hmotné body a hranoly, pričom výsledné hodnoty boli konfrontované s účinkami mnohostenov. V závislosti na dostupných meraniach pozostávala lokálna korekcia z vplyvu vlhkosti pôdy, hladiny podzemnej vody a snehu. Žiadna zo študovaných staníc sa nenachádzala v blízkosti veľkých povrchových vôd.

4.1 Korekcia meraní supravodivého gravimetra

Merania na staniciach Conrad a Viedeň boli získané a priamo opravené od operátorov o chod a štandardné korekcie. V prípade stanice Pecný boli merania získané z webového portálu GGP (GGP ISDC, online). Tieto merania boli dodatočne opravené o štandardné korekcie a chod $17 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$ za rok uvedený v článku (Pálinkáš a kol., 2012). Použité boli merania s hodinovým krokom. V prípade observatória Conrad bola hlavná pozornosť venovaná účinkom snehu. Na staniciach Viedeň a Pecný zahŕňala lokálna korekcia účinky snehu, vlhkosti pôdy a hladiny pozemnej vody.

4.1.1 Conrad

Supravodivý gravimeter je na observatóriu Conrad umiestnený od augusta 2007, kde bol premiestnený zo stanice Viedeň. Jedná sa o geofyzikálne observatórium vybudované ako vodorovný tunel pod vrchom Trafelberg (1146 m). Pri stavbe bola časť svahu odstránená pomocou detonácie. Vyťažený materiál bol po vyhotovení obslužnej budovy použitý na jej zakrytie. Narušenie prirodzeného (vápencového) prostredia výrazným spôsobom komplikuje interpretáciu meraných zmien tiažového zrýchlenia s ohľadom na hydrologické vplyvy. Z tohto dôvodu bol na stanici Conrad analyzovaný len vplyv snehu, ktorý je v dôsledku umiestenia observatória na okraji východných Álp výrazný. Samotný SG sa nachádza v nadmorskej výške 1044 m.



Obr. 1: Variácia tiažového zrýchlenia na observatóriu Conrad spolu s meraniami zrážok, snehu a teploty

Štúdium vplyvu snehu na tiažové zrýchlenie bolo pre túto stanicu zvolené nielen z dôvodu výrazných prídeltov snehu, ale aj dostupných zariadení na meranie výšky a vodnej hodnoty snehu. Na observatóriu sú od konca zimy 2009 okrem snehu monitorované aj zrážky a teplota. Zrážky

a sneh sú spolu s variáciou tiažového zrýchlenia vykreslené na obrázku 1. Zelenou zvislou čiarou sú označené časové úseky s pozorovanou (nenulovou) výškou snehu. Na obrázku je vidieť, že sneh ovplyvňuje výrazne tiažové zrýchlenie. Pri zrážkach a napadaní čerstvého snehu dochádza z pohľadu dlhodobého priemeru k znižovaniu tiažového zrýchlenia. Po topení snehu, prípadne po výrazných zrážkach dochádza k postupnému zväčšovaniu tiažového zrýchlenia, ktoré môže trvať aj niekoľko mesiacov. Tieto javy sú dôsledkom umiestnenia SG do podzemia. Napadnutý sneh sa v najbližšom okolí nachádza nad SG. Po jeho roztopení sa dostáva voda pod výškovú úroveň senzora SG a hodnota tiažového zrýchlenia sa zvyšuje. V práci bol analyzovaný vplyv vody vo forme snehu. Experiment nezahŕňal účinky roztopeného snehu. Eliminácia tohto vplyvu by vyžadovala merania hydrologických parametrov ako vlhkosť pôdy, resp. hladina podzemnej vody, ktoré nie sú pre observatórium dostupné.

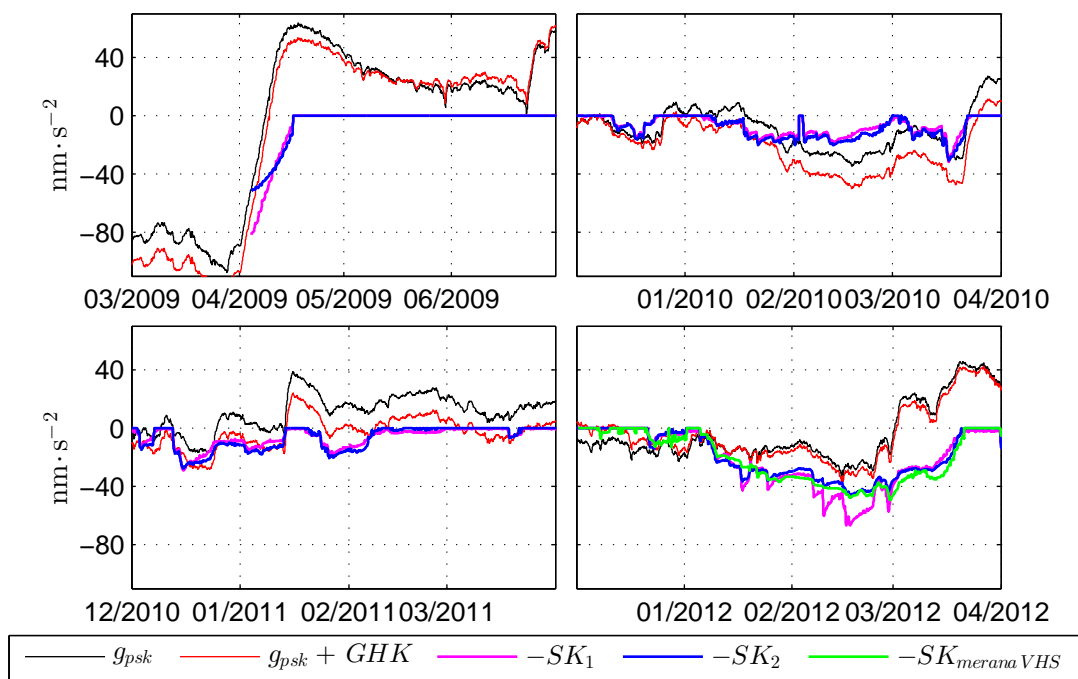
Areál observatória je vybavený senzormi slúžiacimi na pozorovania výšky snehu. Do vzdialenosti 100 metrov od SG sa nachádzajú dva senzory, z ktorých prvý je umiestnený priamo nad SG (nad tunelom). Senzor bol na observatóriu inštalovaný v apríli 2009 a pozorovaná výška snehu z tohto senzora je uvedená v obrázku 1 dole. Koncom roka 2011 pribudlo na observatóriu druhé zariadenie umožňujúce okrem výšky snehu monitorovať aj vodnú hodnotu snehu (VHS), a tým pádom určiť jeho hustotu. Znalosť hustoty, resp. VHS, je nevyhnutná na korektný výpočet korekcie zo snehu. Z tohto dôvodu bolo potrebné transformovať dlhší časový rad meraní prvého senzora (len výška snehu) na VHS. Jednou z možností, ako transformovať výšku snehu na VHS, je použiť existujúce empirické vzťahy, ktoré vznikajú regresnou analýzou meranej výšky a VHS. S ohľadom na známe údaje VHS v období po roku 2011 bol ako najvhodnejší vybraný vzorec (5) pre Švédske hory (Lundberg a kol., 2006). Vzťah (5) platí pre výšku snehu (v_{sneh} v m) do 2 m. Druhou možnosťou (postup 2) prevodu výšky na VHS je odhad vlastnej funkcie na prevod nameraných parametrov. Zvolená bola plošná funkcia (6) so vstupnými údajmi o výške snehu a vonkajšej teplote (t).

$$VHS = (148 + 105v_{sneh})v_{sneh} \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (5)$$

$$VHS = -76.97v_{sneh}^2 + 235.8v_{sneh} + 0.7t \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (6)$$

Vzhľadom na výrazné výškové rozdiely v skúmanej lokalite bolo treba uvážiť vplyv zmeny výšky snehu s nadmorskou výškou. Pri odhade gradientu bol využitý globálny hydrologický model GLDAS/NOAH, ktorý udáva priemerné údaje VHS pre plochu danú mriežkou s krokom 0.25° . Na základe údajov z DMR je priemerná nadmorská výška daného územia 660 m. Z týchto údajov bol odhadnutý gradient 5 cm snehu na 100 výškových metrov. Pre rovinnaté územia, ako v prípade Viedne, je tento vplyv podstatne menší.

Priebeh variácie tiažového zrýchlenia pred a po GHK spolu s určenými účinkami snehu pre prvý (SK_1) a druhý postup (SK_2) odhadu VHS, resp. meranou VHS ($SK_{meranaVHS}$) je zobrazený na obrázku 2. Určené účinky vysoko presahujú hranicu $50 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$, čo je s ohľadom na presnosť SG extrémna hodnota. S výnimkou roku 2009 je možné pozorovať koreláciu medzi pozorovanými hodnotami tiažového zrýchlenia a určenými účinkami. Pri bližšom pohľade na priebeh v marci 2012 je viditeľné nadhodnocovanie účinkov snehu určených podľa postupu 1 (SK_1). To poukazuje na nevhodnosť použitia meraní výšky snehu bez meranej VHS v prípade výrazných prídelov čerstvého snehu. Najväčšie nezhody sú v obdobiach, kedy dochádza k roztápaniu snehu, čo má za následok presuny hydrologických hmôt, a tým pádom aj zmenu znamienka korekcie.



Obr. 2: Variácia tiažového zrýchlenia na observatóriu Conrad spolu s vypočítanými účinkami snehu

4.1.2 Viedeň

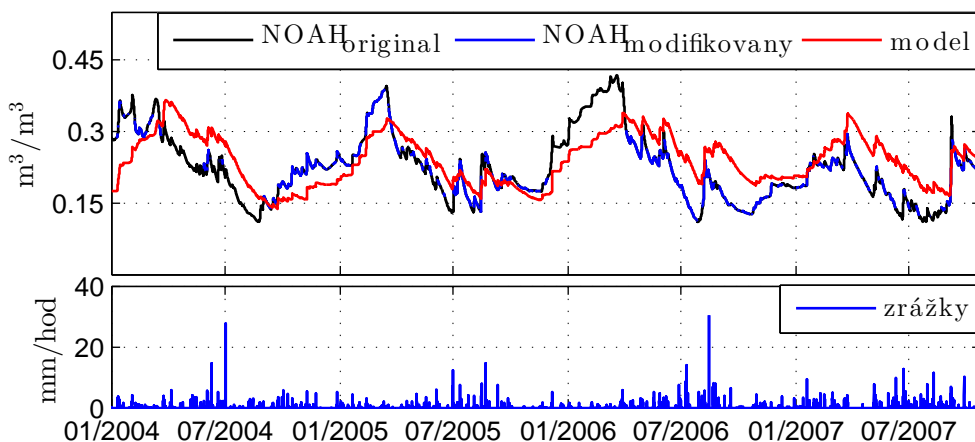
Pre SG na stanici Viedeň nebola doposiaľ realizovaná komplexná analýza hydrologických vplyvov na tiažové zrýchlenie. V tejto stati bol okrem globálneho vplyvu vypočítaný aj vplyv vlhkosti pôdy, podzemnej vody a snehu. Gravimeter bol od roku 1995 do 2007 umiestnený v podzemnom laboratóriu budovy Rakúskeho centrálného úradu pre meteorológiu a geodynamiku. Bod sa nachádza v mierne sklonenom teréne. V areáli so SG bolo realizovaných osem geologických vrtov, pričom maximálna hĺbka jedného z vrtov bola 30 metrov. Vrtom dominujú sedimenty silt a jemnozrný piesok.

Priebeh tiažového zrýchlenia (po štandardných korekciách čiernou farbou) je spolu s meranými hodnotami úhrnov zrážok, výšky snehu a nadmorskej výšky hladiny podzemnej vody zobrazený na obrázku 5. Priamym pozorovaním je možné identifikovať jednotlivé zmeny tiažového zrýchlenia súvisiace so zrážkami a snehom. Konkrétne koniec zimy 2005 (vplyv snehu), v auguste 2006 (zrážky), či na konci zobrazeného časového obdobia v septembri 2007 (zrážky). Zobrazená je len časť variácie od roku 2004, čo súvisí s dostupnosťou atmosférickej korekcie Atm_{cas} . Pri porovnaní s väčšinou SG zapojených do projektu GGP je rozptýlený variácie relatívne malý. To je dôsledkom umiestenia SG do podzemia a špecifickej topografickej situácie. LHK je kladná, zatiaľ čo vplyvom zakrivenia Zeme je GHK záporná. LHK a GHK majú približne ročnú periódu a dochádza tak k interferencii oboch signálov. V prípade observatória Conrad, kde je SG rovnako v podzemnom laboratóriu, je LHK výrazne väčšia než GHK.

Podobne ako pri väčšine staníc so SG, tak aj v prípade Viedne predstavuje pri analýze hydrologických vplyvov najväčší problém nedostatok relevantných údajov. Na stanici Viedeň neboli realizované merania vlhkosti pôdy, ani hladiny podzemnej vody. Dostupné sú meteorologické údaje ako zrážky (hodinové dáta), teplota, rýchlosť a smer vetra, slnečná radiácia či výška snehu (denné dáta).

Korekcia výšky snehu bola počítaná v súlade s postupom uvedeným v predchádzajúcej

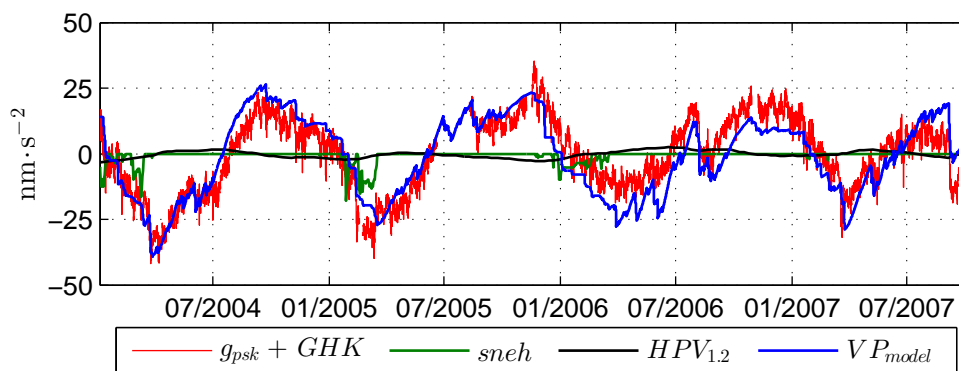
stati. Dostupné denné merania výšky snehu neobsahovali informáciu o VHS. Tá bola učená pomocou vzťahu (5). Do výpočtu bol zahrnutý aj sneh na plochej streche objektu, v ktorom sa SG nachádza. Pomocou účinkov snehu možno vysvetliť časť anomálnej variácie tiažového zrýchlenia, a to konkrétne pre koniec zimy v roku 2005.



Obr. 3: Modelovaná vlhkosť pôdy spolu s hodnotami použitými pri kalibrácii a meranými zrážkami na stanici Viedeň

Výpočet korekcie vplyvu hladiny podzemnej vody bol určený pomocou údajov o HPV z najbližšej dostupnej stanice vzdalenej približne 1.1 km od SG. Nadmorská výška stanice je 184 m (SG je vo výške 193 m). S tým súvisí problematika možného fázového posunu medzi HPV blízko SG a HPV zo spomínanej stanice. Ďalším problémom je určenie diferenčnej hustoty hydrologických hmôt pri výpočte korekcie. V ideálnom prípade by bola určená vododajnosť počas hydrogeologického prieskumu, resp. čerpacou skúškou. Bližší pohľad na obrázok 5 poukazuje na antikoreláciu HPV a tiažového zrýchlenia (g_{psk}). Teoreticky by mala byť pozorovaná korelácia, nakoľko pri zvýšení HPV by sa malo tiažové zrýchlenie v dôsledku priblíženia hmôt zväčšiť. Možným vysvetlením je minimálny vplyv HPV a výrazný vplyv vlhkosti pôdy s podobným priebehom ako HPV. Podobné vysvetlenie naznačuje článok (Meurers, 2006). Pri výpočte korekcie HPV bola najskôr použitá vododajnosť 1%. Korekcia bola počítaná pomocou hranolov so spodnou hranou danou minimálnou výškou v DMR a hornou hranou danou HPV. Segmentácia pomocou hranolov bola zavedená, aby nedošlo k stavu, že je do výpočtu braná oblasť, kde je HPV vyššie ako terén. V týchto miestach HPV (hranoly) kopírovali priebeh terénu s určitým odstupom, aby nebol efekt po následnom výpočte vplyvu vlhkosti pôdy zdvojený. Po aplikovaní GHK, korekcie snehu a VP sa metódou najmenších štvorcov určila vododajnosť $1.2 \pm 0.1\%$. To poukazuje na minimálny vplyv variácie HPV.

Pri výpočte korekcie vlhkosti pôdy bolo potrebné modelovať priebeh vlhkosti v čase. Pri modelovaní vlhkosti pôdy bolo využité zistenie, že korekcia VP určená z modelu GLDAS/NOAH relatívne dobre eliminuje sezónnu variáciu. Problém predstavujú rýchle zmeny tiažového zrýchlenia korelované zo zrážkami. Z tohto dôvodu bola vlhkosť pôdy modelovaná s využitím lokálnych meteorologických meraní (teplota a zrážky), pričom na kalibráciu modelu boli použité VP z GLDAS/NOAH. Konkrétne boli použité merania zrážok a teploty s využitím modelu VP opísaného v článku (Brocca a kol., 2008). Vstupné zrážky boli dodatočne upravené o vplyv snehu. Namerané zrážky počas obdobia so zistenou výškou snehu sa pokladali za nulové. Zároveň boli ku zrážkam pripočítané hodnoty roztopeného snehu. Na kalibráciu modelu boli využité denné

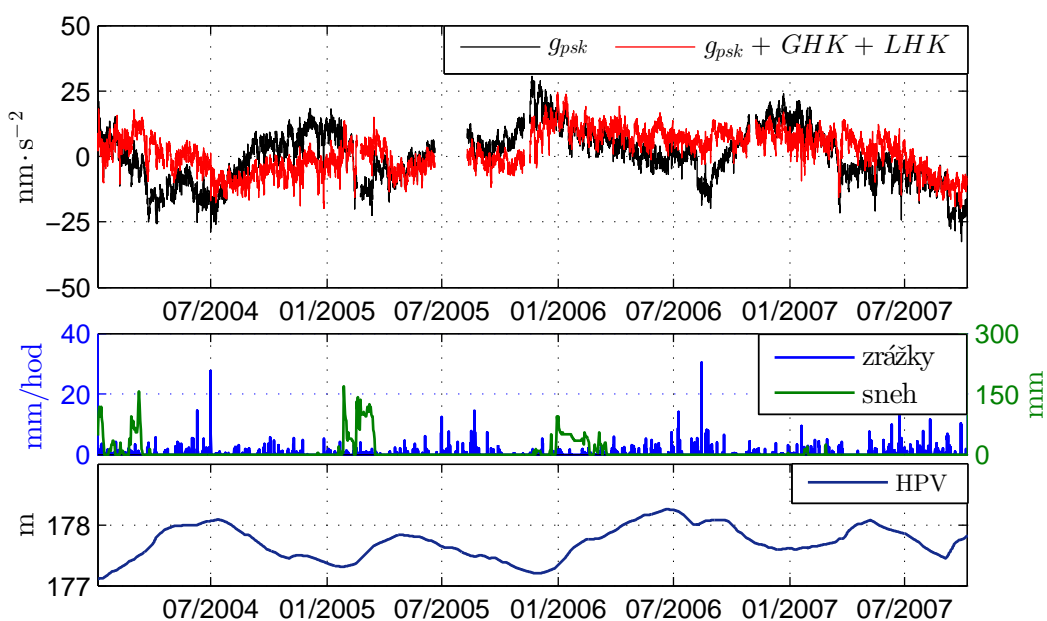


Obr. 4: Variácia tiažového zrýchlenia po GHK na stanici Viedeň spolu s účinkami snehu, hladiny podzemnej vody ($HPV_{1.2}$) a vlhkosti pôdy (modelovaná vlhkosť, resp. vlhkosť z modelu GLDAS/NOAH)

údaje vlhkosti pôdy v priemernej hĺbke 0.2 m. Pred kalibrovaním bola vypočítaná korekcia VP z modelu GLDAS/NOAH spolu s HPV, snehom a GHK. Následne boli v časovom rade tiažového zrýchlenia opravenom o tieto korekcie identifikované miesta, kde hodnoty reziduálneho časového radu neprekračujú $10 \text{ nm}\cdot\text{s}^{-2}$. Práve vlhkosť pôdy modelu GLDAS/NOAH odpovedajúca týmto časovým úsekom bola následne použitá na kalibráciu. Týmto spôsobom boli z kalibrácie eliminované VP modelu GLDAS/NOAH výrazne prevyšujúce pozorované zmeny tiažového zrýchlenia. Výsledok kalibrácie je zobrazený na obrázku 3, kde sú ako originál označené pôvodné VP z modelu GLDAS/NOAH a ako modifikované sú označené VP použité pri kalibrácii. Tento spôsob výpočtu VP je možné aplikovať aj na iné miesta a jeho výhodou je, že znižuje nároky na vstupné údaje. Zrážky a teplota sú na rozdiel od VP štandardne merané parametre.

Pri výpočte korekcie VP bolo potrebné získať informáciu o zmenách vlhkosti pôdy s hĺbkou. Na tento účel bol použitý model NOAH/CLM, ktorý má v porovnaní s modelom NOAH lepšie vertikálne rozlíšenie (10 vrstiev). Na bode Viedne boli z mesačných údajov modelu CLM určené priemerné amplitúdy variácie VP pre stredy jednotlivých vrstiev a roky 2000–2007. Následne bola odhadnutá exponenciálna funkcia útlmu amplitúdy variácie VP s hĺbkou.

Výsledné hodnoty účinkov VP, HPV a snehu spolu s tiažovým zrýchlením opraveným o GHK sú vykreslené v obrázku 4. Tiažové zrýchlenie po zavedení vypočítaných hydrologických korekcií je zobrazené na obrázku 5 červenou. Aplikáciou vypočítaných korekcií dochádza k zníženiu variácie v porovnaní s meraným signálom po štandardných korekciách. Štandardná odchýlka sa v tomto prípade znížila o 27%. Podstatné je odstránenie variácie jednoznačne spojenej s hydrologickými javmi. Odstránené boli spomínané anomálne variácie tiažového zrýchlenia na konci zimy 2005, v auguste 2006 a na konci zobrazeného časového obdobia. Uvedené hodnoty sa viažu k GHK určenej z modelu GLDAS/NOAH. Testované boli aj ostatné GHM, pričom výsledky z hľadiska dosiahnutých štandardných odchýlok (SD) sú uvedené v tabuľke 2. Zmena časového a priestorového rozlíšenie GHM v prípade modelu GLDAS/NOAH nevedie k výraznej zmene výsledkov. Podobné výsledky ako v prípade modelu GLDAS/NOAH boli dosiahnuté s využitím modelu GLDAS/MOS. Naopak, najväčšia hodnota štandardnej odchýlky po hydrologických korekciách bola dosiahnutá s využitím modelu CLM. To potvrdzuje, že voľba rôznych GHM môže výrazným spôsobom ovplyvniť výsledný priebeh tiažového zrýchlenia. Pri hodnotení vhodnosti GHM pomocou štandardnej odchýlky je potrebné spomenúť, že toto kritérium je vhodné len za predpokladu, že reziduálny časový rad neobsahuje dodatočné variácie.



Obr. 5: Variácia tiažového zrýchlenia pred a po vypočítaných hydrologických korekciách na stanici Viedeň spolu s meraniami snehu, zrážok a hladiny podzemnej vody

Tabuľka 2: Základné štatistické ukazovatele pre tiažové zrýchlenie pozorované na stanici Viedeň (5/2004 - 10/2007) a hydrologické korekcie určené z modelov s rôznym časovým a priestorovým rozlíšením

g/GHK	Čas.krok	Rozlíšenie ($^{\circ}$)	SD ($\text{nm}\cdot\text{s}^{-2}$)	Rozsah ($\text{nm}\cdot\text{s}^{-2}$)	SD_{GHK} ($\text{nm}\cdot\text{s}^{-2}$)
g_{psk}	1 hod	-	10.0	63.0	-
$g_{psk}+LHK$	1 hod	-	14.7	68.2	-
+NOAH	24 hod	0.25	7.3	44.3	-
+NOAH	mesiac	0.25	7.6	45.0	1.0
+NOAH	mesiac	1.0	7.6	44.8	-
+VIC	mesiac	1.0	8.0	46.7	3.1
+CLM	mesiac	1.0	10.2	54.1	4.2
+MOS	mesiac	1.0	7.4	45.7	2.8
+WGHM	mesiac	0.5	8.0	48.1	2.5

4.1.3 Pecný

Observatórium Pecný v Českej republike je od februára 2007 vybavené SG. Senzor SG sa nachádza pod úrovňou terénu, avšak pri porovnaní so stanicami Viedeň alebo Conrad je uloženie SG vzhľadom na terén plytké. Pod terénom sa nachádza len časť miestnosti s SG. Priebeh tiažového zrýchlenia (po štandardných korekciách čiernou farbou) je spolu s meranými hodnotami úhrnov zrážok a hladiny podzemnej vody zobrazený na obrázku 6. Výška snehu bola v spomínanom obrázku určená z modelu GLDAS/NOAH a inverziou vzťahu (5). V priebehu tiažového zrýchlenia je prítomná jednoznačne identifikovateľná sezónna variácia s ročnou periódou. Na prvý pohľad nie je možné identifikovať tak výrazné zmeny tiažového zrýchlenia spojené s hydrologickými procesmi ako v prípade staníc Conrad a Viedeň. Dôvodom je vplyv uloženia SG voči terénu. Výnimkou je rýchla zmena výšky HPV v septembri 2007, ktorá je pozorovateľná aj v priebehu tiažového zrýchlenia. Podobný jav je možné vidieť aj na konci zobrazeného časového obdobia v auguste 2010. Tieto nárasty sú spojené so zrážkovou činnosťou. Koreláciu medzi HPV a tiažovým zrýchlením je možné pozorovať aj koncom februára 2009.

Tabuľka 3: Dostupné hydrologické merania na observatóriu Pecný získané z (GGP ISDC, online).

meranie	časový krok (min)	úrovne (m)	od (dátum)
VP _{vychod}	1	0.12 - 0.31 - 0.60 - 0.86 - 1.20	1.5.2007
VP _{zapid}	1	0.12 - 0.52 - 0.91	1.1.2009
VP _{sever}	1	0.14 - 0.56 - 0.91	1.1.2009
HPV ¹	1	-	1.5.2007
HPV ²	1	-	1.1.2009
HPV ³	1	-	1.8.2009

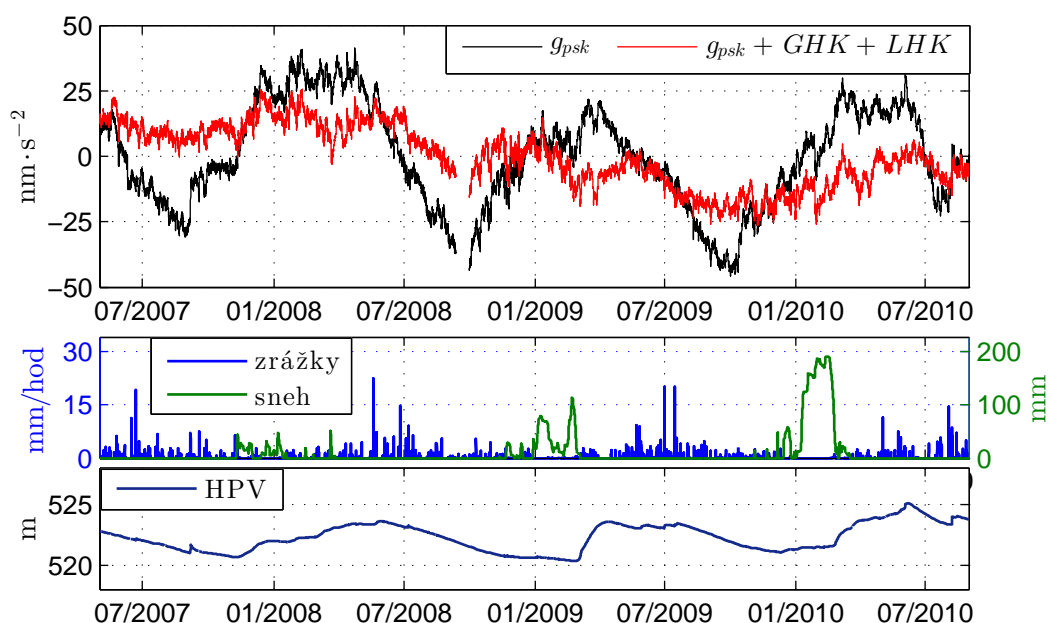
Pri výpočte LHK možno na rozdiel od Viedne vychádzať z meraní vlhkosti pôdy a HPV. Tieto merania sú poskytované s minútovým krokom prostredníctvom webového portálu GGP (GGP ISDC, online). Nedostupné sú len informácie o výške snehu, resp. jeho vodnej hodnote. Nevýhodou je výrazné podhodnotenie množstva snehu z globálneho modelu, čo vyplýva z porovnania meraných hodnôt a interpolovaných z modelu GLDAS/NOAH pre stanice Conrad a Viedeň. Spomínaná neznalosť presného množstva snehu nie je v prípade observatória Pecný vzhľadom na vplyv topografie závažná.

Z hľadiska prístupu možno výpočet hydrologickej korekcie realizovaný pre stanice Conrad a Viedeň označiť ako fyzikálny. Výnimkou bol len odhad vododajnosti pri účinkoch HPV založený na metóde najmenších štvorcov. Vďaka dostupnosti hydro-meteorologických meraní boli pre stanicu Pecný korekcie určené numerickým aj fyzikálnym spôsobmi.

Výpočet LHK označený v tejto stati ako fyzikálny využíval rovnaký matematický postup ako pre Conrad a Viedeň. Vlhkosť pôdy je na observatóriu meraná na troch miestach (označenie podľa svetových strán) v rôznych hĺbkach. Merania VP obsahovali občasné výpadky. Ich vyplnenie bolo realizované modelovaním VP pomocou meraných zrážok, teploty a modelu spomínaného v predošlej stati podľa článku (Brocca a kol., 2008). Na kalibráciu modelu boli použité dostupné merania z jednotlivých senzorov. Podobne ako v prípade Viedne bol z modelu GLDAS/CLM odhadnutý priebeh amplitúdy variácie VP s hĺbkou. Odhadnutá funkcia slúžila na extrapoláciu údajov mimo rozsah merania VP. Hodnoty VP pre jednotlivé výškové úrovne medzi maximálnou

a minimálnou úrovňou merania boli získané interpoláciou. Pri výpočte korekcie VP boli použité rôzne varianty. V prvom boli použité všetky dostupné merania vlhkosti pôdy, t.j. vo všetkých smeroch a hĺbkach. Oblasť výpočtu LHK bola rozdelená na základe azimutu do troch zón (severná, východná a západná). Druhým variantom výpočtu bolo použitie meraní pre východný senzor VP, nakoľko ten pokrýva najdlhšie časové obdobie a zároveň udáva VP do najväčšej hĺbky. Posledným tretím variantom bolo použitie rovnakej metódy modelovania VP ako v prípade stanice Viedeň, kde sa použili na kalibráciu modelu VP údaje z modelu GLDAS/NOAH. Z hľadiska štandardnej odchýlky výsledného tiažového zrýchlenia po lokálnej a globálnej hydrologickej korekcii boli najlepšie výsledky dosiahnuté pre prvý variant.

Na výpočet korekcie HPV bolo možné použiť merania z troch vrtov v areáli observatória. Vzhľadom na dĺžku merania boli na ďalšie výpočty použité len merania označené v tabuľke 3 ako HPV¹. Vododajnosť bola určená podobne ako v prípade stanice Viedeň, t.j. metódou najmenších štvorcov $0.61 \pm 0.04\%$. Táto hodnota sa viaže na korekciu VP označenú v predchádzajúcom texte ako prvý variant. V článku (Pálinkáš a kol., 2010), ktorý sa venuje výpočtu hydrologických účinkov na tejto stanici, je použitý podobný postup ako v prípade druhého variantu (bez odhadu vododajnosti).



Obr. 6: Variácia tiažového zrýchlenia pred a po vypočítaných hydrologických korekciách na observatóriu Pecný spolu s meraniami snehu, zrážok a hladiny podzemnej vody

Odčítaním účinkov VP (prvý variant), HPV a snehu bol získaný výsledný reziduálny časový rad tiažového zrýchlenia zobrazený na obrázku 6. Aplikáciou hydrologických korekcií došlo k výraznému zníženiu rozptylu variácie tiažového zrýchlenia. Štandardná odchýlka a rozsah variácie bol znížený o 40%. Zároveň bola minimalizovaná zmena tiažového zrýchlenia v septembri 2007 spojená s hydrologickými procesmi. Podobne to je pre variáciu koncom februára 2009, či v auguste 2010.

Vypočítaná štandardná odchýlka a rozsah variácie sú silne ovplyvnené trendovou zložkou priebehu reziduálneho časového radu. Trend odhadnutý lineárnou regresiou sa po aplikácii hydrologických korekcií zvýšil z $-2.1 \pm 0.2 \text{ nm}\cdot\text{s}^{-2}$ za rok na $-9.0 \pm 0.1 \text{ nm}\cdot\text{s}^{-2}$ za rok. Z hľadiska geodynamiky by získaný trend reziduálneho časového radu znamenal, že v danej oblasti dochá-

dza k zdvihu. Je však potrebné spomenúť, že časť trendu bola do signálu pridaná pripočítaním GHK, ktorej trend bol v danom časovom období odhadnutý na $-3.7 \pm 0.1 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2} / \text{rok}$. Podobne ako v prípade Viedne, aj na stanici Pecný boli testované dostupné GHM. Dosiahnuté výsledky z hľadiska štandardných odchýlok, ako aj trendu sú zobrazené v tabuľke 4. V tabuľke je možné vidieť rôzne hodnoty trendu pre jednotlivé GHK (najnižší pre GLDAS/CLM). To potvrdzuje, že časť trendu bola spôsobená práve hydrologickou korekciou a pred samotnou interpretáciou je potrebné zvážiť vplyv zavádzaných korekcií. Štyridsať percent trendu je spôsobených GHK, 35% LHK a len zvyšok tvorí trend pôvodného tiažového zrýchlenia po štandardných korekciách. Pri interpretovaní trendu je navyše potrebné uvážiť dĺžku časového radu 3.5 roka. V prípade tak krátkeho časového obdobia môže rok s nadpriemernými úhrnmi zrážok vniesť do korekcií trendovú zložku. Svoju úlohu môže zohrávať aj fakt, že merania neboli na rozdiel od staníc Conrad a Viedeň získané od operátora, ale z webového portálu GGP. Po prerušení merania v auguste 2008 tak môže byť odskok (konštantný posun) po opätovnom spustení merania. Z článku (Pálinkáš a kol., 2013) vyplýva, že desaťročný časový rad variácie tiažového zrýchlenia (AG a SG bez hydrologickej korekcie) na stanici Pecný nevykazuje prakticky žiaden trend. Podobne ako vo Viedni, tak aj na stanici Pecný boli najhoršie výsledky z hľadiska štandardnej odchýlky dosiahnuté pomocou modelu GLDAS/CLM. Naopak najlepšie výsledky dosahujú mesačné modely GLDAS/VIC a GLDAS/MOS. Nemožno očakávať výraznú zmenu štandardnej odchýlky pri prechode z mesačných na denné údaje, čo vyplýva z porovnania modelu GLDAS/NOAH s rôznym časovým rozlíšením.

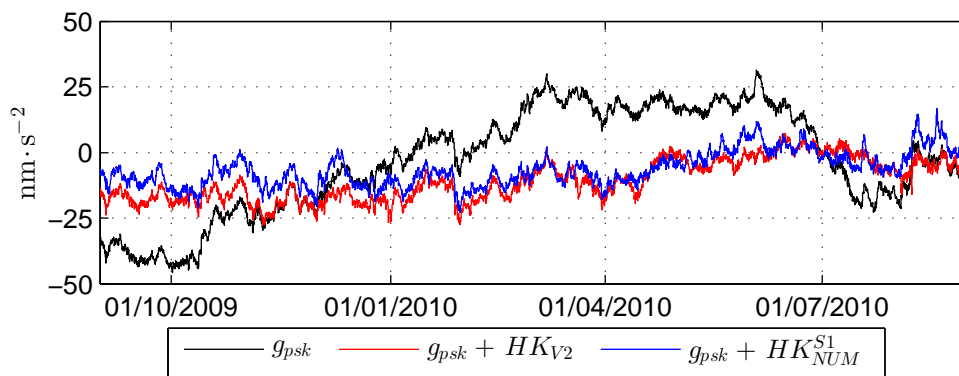
Tabuľka 4: Základné štatistické ukazovatele pre tiažové zrýchlenie pozorované na stanici Pecný (5/2007 - 9/2010) a hydrologické korekcie určené z modelov s rôznym časovým a priestorovým rozlíšením

g/GHK	Čas.krok	Rozlíšenie (°)	SD ($\text{nm} \cdot \text{s}^{-2}$)	Rozsah ($\text{nm} \cdot \text{s}^{-2}$)	SD_{GHK} ($\text{nm} \cdot \text{s}^{-2}$)	Trend ($\frac{\text{nm} \cdot \text{s}^{-2}}{\text{rok}}$)
g_{psk}	1 hod	-	19.1	87.2	-	-2.1
$g_{psk} + \text{LHK}$	1 hod	-	15.3	75.3	-	-5.3
+NOAH	24 hod	0.25	11.6	52.0	-	-9.0
+NOAH	mesiac	0.25	11.7	53.4	1.8	-9.0
+NOAH	mesiac	1.0	11.4	52.8	-	-8.8
+VIC	mesiac	1.0	10.9	53.3	2.8	-8.7
+CLM	mesiac	1.0	12.5	62.2	4.8	-6.5
+MOS	mesiac	1.0	10.1	52.3	2.6	-7.4

Numerický prístup výpočtu hydrologických korekcií vychádza z článku (Creutzfeldt a kol., 2010), kde je tento postup označený ako štatistický. Výpočet je založený na viacnásobnej lineárnej regresii, pomocou ktorej sú súčasne odhadované regresné parametre medzi tiažovým zrýchlením po štandardných korekciách a jednotlivými hydrologickými parametrami. Konkrétne boli použité merania HPV s najdlhším záznamom, t.j. HPV¹, päť úrovní vlhkosti pôdy meraných na východnej strane a sneh daný modelom GLDAS/NOAH. Na rozdiel od spomínaného článku bola do regresnej analýzy zahrnutá aj GHK.

Numerický prístup výpočtu nemá žiaden fyzikálny základ, čo je možné demonštrovať na znamienkach jednotlivých parametrov. V prípade VP v hĺbke 0.6 m je parameter záporný a pre

ostatné vlhkosti kladný. To nie je vzhľadom na uloženie gravimetra voči terénu reálne. Cieľom výpočtu korekcie týmto spôsobom je minimalizovať vplyv jednotlivých parametrov vychádzajúc z predpokladu, že jednotlivé hydrologické parametre prispievajú k výslednej variácii tiažového zrýchlenia. Zaujímavý je až súčet všetkých hodnôt, nie jednotlivé parametre. Na rozdiel od fyzikálneho prístupu sú numerickým spôsobom dosiahnuté veľmi dobré výsledky s ohľadom na štandardnú odchýlku výsledného tiažového zrýchlenia. To však vzhľadom na povahu výpočtu minimalizujúceho opravy nie je prekvapením. Aplikáciou takto vypočítaných korekcií bola štandardná odchýlka znížená na úroveň $7.8 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$, čo predstavuje zníženie variácie o 59%. Trend takto získaného časového radu je $-2.9 \pm 0.1 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$.



Obr. 7: Variácia tiažového zrýchlenia pred a po vypočítaných hydrologických korekciách numerickým spôsobom (scenár 1, HK_{NUM}^{S1}) a fyzikálnym spôsobom (variant 2, HK_{V2}) pre ročné merania na observatóriu Pecný

Odhadnuté regresné parametre by mali byť použité na výpočet hydrologickej korekcie na merania vykonané po analyzovanom časovom období v danej lokalite. Voľba časového obdobia použitého pri výpočte viacnásobnej lineárnej regresie ovplyvňuje výsledné hodnoty regresných parametrov. Testované boli dva scenáre, prvým bol odhad regresných parametrov pre časové obdobie nezahŕňajúce posledný rok merania, druhým zas časové obdobie bez prvého roku merania. Získané výsledky poukazujú na nízku citlivosť numerického prístupu na zmenu analyzovaného času. Porovnanie posledného (dostupného) roku merania po zavedení hydrologických korekcií (HK) určených fyzikálnym prístupom (variant 2) a numerickým prístupom (scenár 1) je uvedené na obrázku 7. V tomto prípade bol zvolený variant 2, nakoľko využíva rovnaké vstupné údaje ako scenár 1. Tiažové zrýchlenie po hydrologických korekciách má v oboch prípadoch podobný priebeh. Pomocou fyzikálneho prístupu boli lepšie odstránené krátkodobé variácie. Pri hodnotení výsledkov fyzikálneho a numerického prístupu výpočtu hydrologickej korekcie je potrebné mať na pamäti pozítiva a negatíva oboch prístupov. Pri fyzikálnom prístupe je nevýhodou vyšší počet vstupov potrebných na výpočet. Výhodou v porovnaní s numerickým prístupom však je, že nemá tendenciu odstraňovať variácie s podobným priebehom ako niektorý z použitých hydro-meteorologických parametrov.

4.2 Absolútne gravimetrické merania na Slovensku

Na vybraných bodoch Štátnej gravimetrickej siete na Slovensku sú realizované opakované merania absolútneho tiažového zrýchlenia. Tie slúžia na údržbu gravimetrickej siete, ako aj na monitorovanie možných vertikálnych pohybov danej lokality. Vplyv hydrosféry môže výrazným spôsobom ovplyvniť interpretáciu týchto meraní. Z tohto dôvodu boli analyzované štyri body

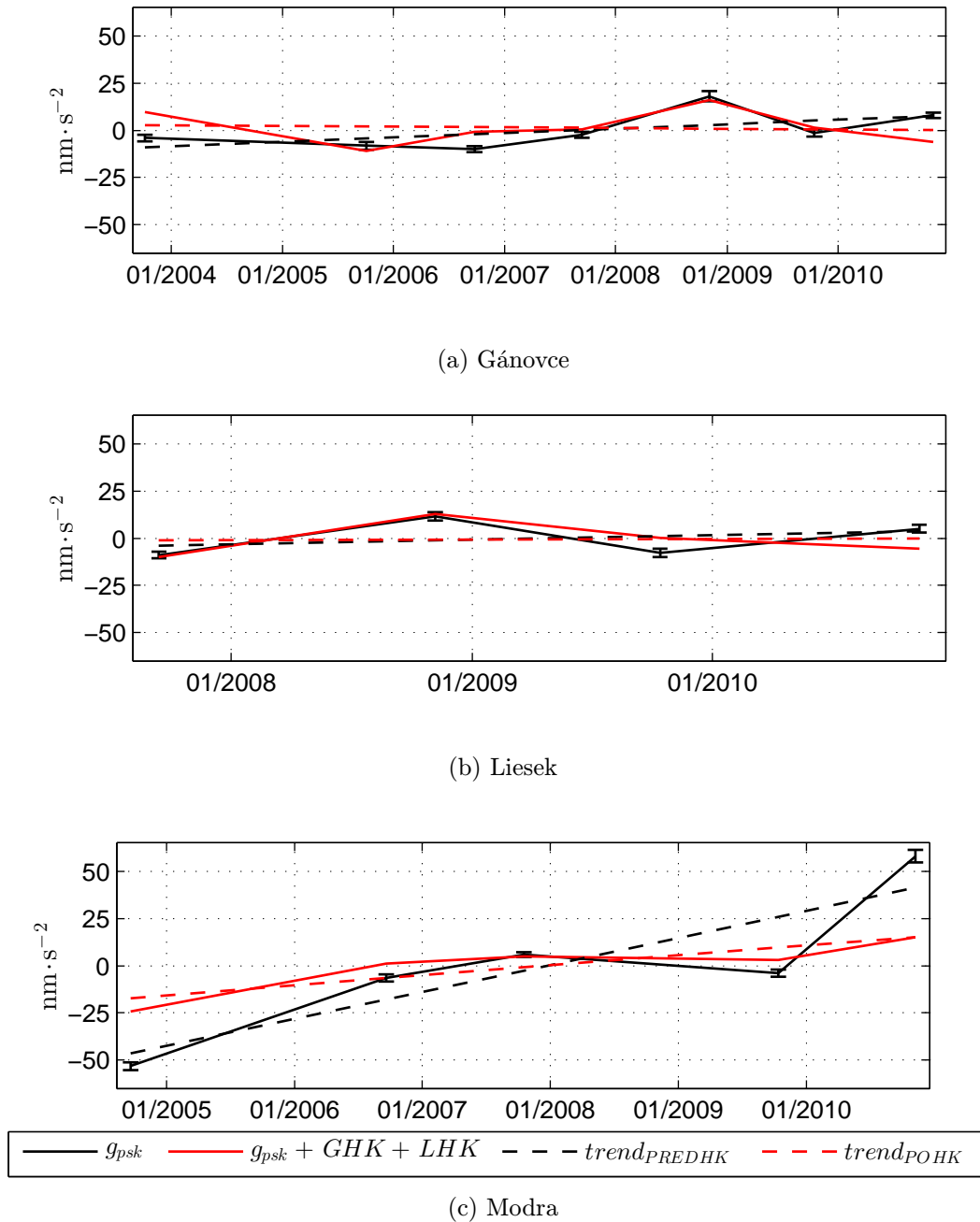
siete s meraniami vykonanými jedným AG FG5 (FG5 č. 215 z observatória Pecný). Konkrétne boli zvolené body Gánovce, Liesek, Modra a Skalnaté Pleso.

Všetky merania boli operátormi gravimetra opravené o štandardné korekcie. Atmosférická korekcia bola určená pomocou konštantného regresného parametra $-3 \text{ nm}\cdot\text{s}^{-2}/\text{hPa}$. To môže mať za následok rozdiel viac ako $10 \text{ nm}\cdot\text{s}^{-2}$ v porovnaní s modelom Atmacs. Na analýzu boli použité merania prepočítané daným gradientom do výšky 1.22 m, čo je hodnota blízka efektívnej výške gravimetra FG5. Tým sa minimalizoval vplyv chyby určenia gradientu tiažového zrýchlenia.

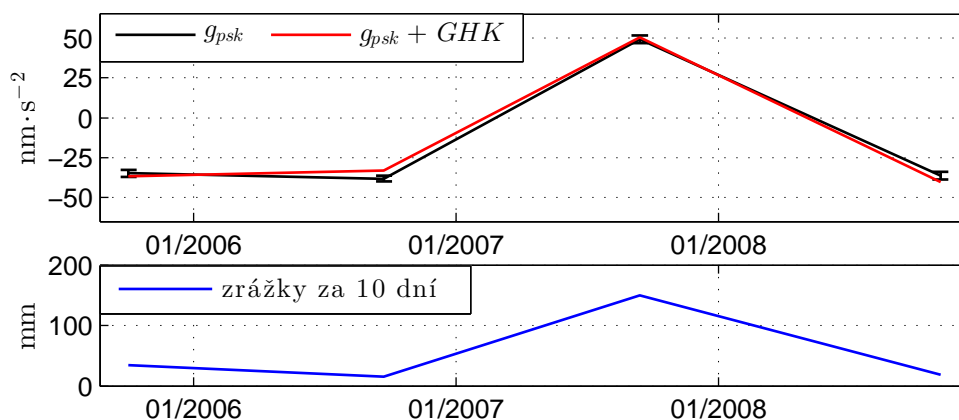
Analyzované body sú na miestach, ktoré neboli budované ako špecializované geodetické alebo geofyzikálne observatória. Tomu odpovedajú aj dostupné hydrologické a meteorologické merania. Ani na jednej zo spomínaných staníc nie je vykonávané meranie HPV, či vlhkosti pôdy. Z tohto dôvodu bol do výpočtu hydrologických korekcií zahrnutý okrem globálneho vplyvu len vplyv modelovanej vlhkosti pôdy a snehu. Sneh bol získaný podobne ako v prípade stanice Pecný z modelu GLDAS/NOAH a využitím inverzie vzorca (5). Merané zrážky a teplota pre časové obdobie pokrývajúce vykonané merania boli dostupné na stanicách Gánovce, Liesek a Skalnaté Pleso. To umožňovalo modelovať variáciu VP ako v prípade stanice Viedeň. Vzhľadom na malé množstvo meraní nebol pri kalibrácii realizovaný výber časových úsekov s reziduálnym časovým radom pod $10 \text{ nm}\cdot\text{s}^{-2}$. Na stanici Modra boli použité priamo hodnoty z modelu GLDAS/NOAH (do 2 m). Dôvodom je nesúlad časového obdobia dostupných meraní zrážok a meraní tiažového zrýchlenia. Globálna korekcia bola na všetkých bodoch určená z modelu GLDAS/NOAH.

Výsledný priebeh tiažového zrýchlenia na bodoch Gánovce, Liesek a Modra pred a po hydrologickej korekcii je zobrazený na obrázku 8. Zobrazené stredné chyby pred zavedením GHK sa vzťahujú k vnútornej presnosti merania. Pripočítaním hydrologickej korekcie došlo k zníženiu variácie na bodoch Liesek a Modra. V prípade stanice Liesek je malý rozptyl aj pred pripočítaním hydrologickej korekcie, čo je možné vysvetliť umiernením AG v miestnosti s čiastočným zanorením do terénu podobne ako pre SG na observatóriu Pecný. Výška merania AG je na bode Liesek v úrovni terénu, čo má za následok takmer nulové účinky lokálnych hydrologických hmôt. V prípade ostatných staníc môžeme hovoriť o nadzemných stanicách. Výrazné zníženie štandardnej odchýlky až o 60 % možno pozorovať na stanici Modra. V tomto prípade je na rovnakej úrovni aj zníženie trendu z $14 \pm 5 \text{ nm}\cdot\text{s}^{-2}/\text{rok}$ na $5 \pm 2 \text{ nm}\cdot\text{s}^{-2}/\text{rok}$. Variácia priebehu tiažového zrýchlenia na stanici Gánovce sa hydrologickou korekciou neznížila. Korekcia neznížila výrazne zmenu tiažového zrýchlenia v roku 2008, a naopak zvýšila variáciu pre prvé meranie v roku 2003. To môže byť dôsledkom neadekvátnych hodnôt modelu GLDAS/NOAH v oblasti Vysokých Tatier. V obrázku je čiarkovanou čiarou zobrazený odhadnutý trend pred a po hydrologických korekciách. Vo všetkých prípadoch došlo k zníženiu trendovej zložky. Pripomeňme, že práve trend v gravimetrických meraniach je z hľadiska geodézie hlavným analyzovaným signálom, ktorý slúži na detekciu vertikálnych pohybov.

Štandardný postup výpočtu LHK nie je vyhovujúci pre miesta, akým je Skalnaté Pleso. Vo Vysokých Tatrách nemožno predpokladať rovnomernú vrstvu pôdy ani tvorbu HPV ako v rovinatom území Transport vody v takomto prostredí je výrazne odlišný od podmienok na ostatných analyzovaných stanicách. Z tohto dôvodu bola na stanici Skalnaté Pleso určená len GHK. Priebeh tiažového zrýchlenia pred a po GHK je zobrazený na obrázku 9. V spodnej časti grafu sú zobrazené akumulované zrážky za posledných 10 dní pred meraním. Extrémny odskok tiažového zrýchlenia v roku 2007 o viac ako $80 \text{ nm}\cdot\text{s}^{-2}$ je korelovaný práve s vykresleným priebehom akumulovaných zrážok. Vzhľadom na nadmorskú výšku bodu sa väčšina vody zo zrážok nachádza pod AG a hodnota tiažového zrýchlenia sa zväčší. Pripomeňme, že reprodukovateľnosť FG5 č. 215 bola odhadnutá na $11 \text{ nm}\cdot\text{s}^{-2}$. To súčasne s uvedenými výsledkami potvrdzuje potrebu uváženia vplyvu hydrosféry pri každej interpretácii presných gravimetrických meraní.



Obr. 8: Variácia tiažového zrýchlenia na absolútnych gravimetrických bodoch Gánovce, Liesek a Modra, pred a po hydrologickej korekcii



Obr. 9: Variácia tiažového zrýchlenia pred a po GHK na bode Skalnaté Pleso spolu s hodnotami akumulovaných zrážok za posledných 10 dní pred meraním

5 Prínos pre vedu a prax

- Podrobné testovanie výpočtu globálnej hydrologickej korekcie z hľadiska výberu matematického postupu a vplyvu rôznych vstupných údajov na výslednú hodnotu korekcie.
- Bol navrhnutý postup výpočtu globálnej a lokálnej hydrologickej korekcie. Navrhnutý postup výpočtu korekcií bol následne využitý pri tvorbe skupiny programov v prostredí Matlab. Programy umožňujú výpočet globálnej a lokálnej korekcie v ľubovoľnom mieste, za predpokladu vstupných údajov o polohe bodu, digitálnom modeli reliéfu a hydrologických parametroch.
- V rámci dizertačnej práce boli podrobne analyzované hydrologické vplyvy na merania supravodivým gravimetrom. V prípade stanice Viedeň sa jedná o prvé komplexné zhodnotenie hydrologických vplyvov na tiažové zrýchlenie zahŕňajúce globálny a lokálny vplyv. Lokálny vplyv zahŕňal účinky variácie vlhkosti pôdy, hladiny podzemnej vody a snehu. Aplikovaním vypočítaných hydrologických korekcií došlo k zníženiu štandardnej odchýlky o 27%. Podstatné je odstránenie zmien tiažového zrýchlenia jednoznačne súvisiacich s hydrologickou variáciou. Na observatóriu Conrad bol podrobne analyzovaný vplyv snehu a navrhnutý postup eliminácie jeho vplyvu.
- Bol realizovaný prvý výpočet globálnej a lokálnej hydrologickej korekcie na vybraných bodoch slovenskej Štátnej gravimetrickej siete s opakovaným meraním absolútneho tiažového zrýchlenia. Tieto merania slúžia na určenie vertikálnych deformácií v sledovanej oblasti. Z tohto dôvodu je pri interpretácii potrebné určiť trendovú zložku. Tá v prípade stanice Modra dosahuje pred zakomponovaním hydrologického vplyvu nezanedbateľné hodnoty. To by viedlo k nekorektnej interpretácii, t.j. v danej oblasti dochádza k poklesu. Zavedením vypočítaných korekcií došlo k zníženiu trendovej zložky na všetkých analyzovaných bodoch (Liesek, Gánovce a Modra). To potvrdzuje nevyhnutnosť uvažovania hydrologických vplyvov pri využití gravimetrických meraní na sledovanie vertikálnych pohybov. Na stanici Skalnaté Pleso bol identifikovaný jednoznačný súvis medzi zmenou tiažového zrýchlenia a lokálnym hydrologickým vplyvom.

6 Záver

Cieľom dizertačnej práce bolo analyzovať vplyv variácie hydrologických hmôt na terestrické gravimetrické merania. Motiváciou analýzy hydrologických vplyvov na tiažové zrýchlenie je potreba oddelenia environmentálneho signálu od signálu súvisiaceho so štúdiom geodynamických procesov. Ako bolo prezentované v práci, vplyv hydrosféry niekoľkonásobne prevyšuje presnosť súčasných gravimetrov, ako aj účinky javov študovaných v geodézii, či geofyzike.

S cieľom minimalizácie hydrologických vplyvov boli testované rôzne matematické a hydrologické modely. Vypočítané hydrologické korekcie boli aplikované na tri stanice so supravodivým gravimetrom a na štyri stanice s opakovaným absolútnym gravimetrickým meraním. Dosiahnuté bolo zníženie celkovej variácie tiažového zrýchlenia a odstránenie zmien jednoznačne spojených s hydrologickými procesmi.

Výsledky práce je možné využiť pri analýze súčasných meraní a pri budovaní nových gravimetrických staníc, ktorým by mala predchádzať analýza možných hydrologických vplyvov. Ako bolo spomenuté v práci, v prípade umiestnenia gravimetra do podzemia môže dôjsť k vyrušeniu globálneho a lokálneho vplyvu. To však vyžaduje špeciálnu konšteláciu s ohľadom na vplyv terénu. Príkladom takejto stanice je Viedeň. Umištením meracieho systému gravimetra do výškovej úrovne najbližšieho terénu, tak ako v prípade stanice Liesek, sú minimalizované lokálne účinky, ktorých výpočet je z hľadiska vstupných údajov najzložitejší. Gravimetre v nadzemných laboratóriách zaznamenávajú spravidla najväčšiu amplitúdu variácie tiažového zrýchlenia. Táto variácia tak výrazne prekrýva signál geodynamického pôvodu. Tieto predpoklady platia pre rovinné a mierne sklonené územia. Výpočet sa komplikuje v prípade umiestnenia bodu do vysokohorského prostredia. V takomto prostredí je pri výpočte dôležité širšie okolie bodu. Problém zároveň predstavuje meranie a modelovanie hydrologických parametrov v takomto prostredí. Príkladom sú stanice Conrad a Skalnaté Pleso, kde lokálny vplyv niekoľkonásobne prevyšuje globálny. Problém pri výpočte hydrologických korekcií predstavuje nedostupnosť hydro-meteorologických meraní. Z tohto dôvodu je potrebné existujúce a budované stanice vybaviť zariadeniami na monitorovanie vlhkosti pôdy, hladiny podzemnej vody a výšky snehu spolu s jej vodnou hodnotou. Tieto informácie je vhodné doplniť hydrogeologickým prieskumom.

Dosiahnuté výsledky je možné použiť pri analýze absolútnych gravimetrických meraní na Slovensku, či meraní rakúskeho supravodivého gravimetra. V práci bolo na terestrických gravimetrických meraniach demonštrované, že neuváženie vplyvu hydrosféry vedie k nesprávnej interpretácii. Pri presných meraniach supravodivého gravimetra vnáša hydrosféra z geodetického pohľadu do meraní nežiadúci šum. Na staniciach Viedeň a Pecný bolo dosiahnuté zníženie variácie tiažového zrýchlenia na úrovni 27% až 40%. Minimalizácia vplyvu variácie hydrologických hmôt na gravimetrické merania prispieva nielen ku korektnej interpretácii meraní, ale umožňuje využitie meraní tiažového zrýchlenia v ďalších vedných disciplínach.

Summary

Impact of Water Mass Variation on Gravity Measurements

The thesis deals with the analysis of hydrological effects on gravity. In geodetic point of view, hydrosphere induces gravity variation which needs to be eliminated. The hydrosphere affects short-periodic as well as long-periodic component of gravity variation. The amplitude of this variation highly exceeds the accuracy of current gravimeters and studied phenomena in geodesy or geophysics. Different hydrological models and various calculation methods were analyzed, which led to the calculation of hydrological correction. The correction was tested at three stations with superconducting gravimeter, namely Conrad, Vienna and Pecný. Additionally, four stations with repeated absolute gravity measurements in Slovakia were analyzed. Depending on the location, a reduction of the gravity variation of 30% to 40% was achieved. At the same time, gravity variation clearly related to hydrological processes was removed. The trend of measured gravity was minimized for stations with absolute gravity measurements. The non-consideration of hydrological effect would lead to incorrect interpretation of measured data.

The achieved results will be used for the analysis of absolute gravity measurements in Slovakia and for the interpretation of superconducting gravimeter measurements in Austria. The understanding of the hydrological effect on gravity will not only contribute to the fair interpretation of the measurements, but also enable the use of gravity measurements in other disciplines.

Literatúra

- BROCCA, L. – MELONE, F. – MORAMARCO, T.: On the estimation of antecedent wetness conditions in rainfall–runoff modelling. *Hydrological Processes*, 22(5):629–642, 2008. ISSN 1099-1085.
- CREUTZFELDT, B. – GÜNTNER, A. – WZIONTEK, H. – MERZ, B.: Reducing local hydrology from high-precision gravity measurements: a lysimeter-based approach. *Geophysical Journal International*, 183(1):178–187, 2010. ISSN 1365-246X.
- DÖLL, P. – KASPAR, F. – LEHNER, B.: A global hydrological model for deriving water availability indicators: model tuning and validation. *Journal of Hydrology*, 270(1–2):105–134, 2003. ISSN 0022-1694.
- FANG, H. – WON, Y. I.: Readme document for Global Land Data Assimilation System GLDAS Products. Technical report, NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center, December 2009.
- FARRELL, W. E.: Deformation of the Earth by surface loads. *Reviews of Geophysics*, 10(3): 761–797, 1972. ISSN 1944-9208.
- HINDERER, J. – CROSSLEY, D. – WARBURTON, R. J.: 3.04 - Gravimetric Methods – Superconducting Gravity Meters. *Treatise on Geophysics*, s. 65–122. Elsevier, Amsterdam, 2007. ISBN 978-0-444-52748-6.
- JCGM: Joint Committee for Guides in Metrology: Evaluation of measurement data–Guide to the expression of uncertainty in measurement. Bureau International des Poids et Mesures, 2008.
- KLÜGEL, T. – WZIONTEK, H.: Correcting gravimeters and tiltmeters for atmospheric mass attraction using operational weather models. *Journal of Geodynamics*, 48(3–5):204–210, 2009. ISSN 0264-3707.
- LAMBERT, A. – BEAUMONT, C.: Nano variations in gravity due to seasonal groundwater movements: Implications for the gravitational detection of tectonic movements. *Journal of Geophysical Research*, 82(2):297–306, 1977. ISSN 2156-2202.
- LUNDBERG, A. – RICHARDSON-NÄSLUND, C. – ANDERSSON, C.: Snow density variations: consequences for ground-penetrating radar. *Hydrological Processes*, 20(7):1483–1495, 2006. ISSN 1099-1085.
- MEURERS, B.: Long and short term hydrological effects on gravity in Vienna. *Bulletin d'Information des Marées Terrestres*, (142):11343–11351, 2006. ISSN 0542-6766.
- PÁLINKÁŠ, V. – KOSTELECKÝ, J. – DOHNAL, M. – ŠANDA, M.: Analýza hydrologických variací tíhového zrychlení na Geodetické observatoři Pecný. *Geodetický a kartografický obzor*, 56(5):93–103, 2010. ISSN 0016-7076.
- PÁLINKÁŠ, V. – KOSTELECKÝ, J. – VALKO, M.: Charakteristiky přesnosti absolutního gravimetru FG5 č. 215. *Geodetický a kartografický obzor*, 58(5):97–102, 2012. ISSN 0016-7096.

PÁLINKÁŠ, V. – LEDERER, M. – KOSTELECKÝ, J. – ŠIMEK, J. – MOJZEŠ, M. – FERIANC, D. – CSAPÓ, G.: Analysis of the repeated absolute gravity measurements in the Czech Republic, Slovakia and Hungary from the period 1991–2010 considering instrumental and hydrological effects. *Journal of Geodesy*, 87(1):29–42, 2013. ISSN 0949-7714.

RODELL, M. – HOUSER, P. R. – JAMBOR, U. – GOTTSCHALCK, J. – MITCHELL, K. – MENG, C. J. – ARSENAULT, K. – COSGROVE, B. – RADA KOVICH, J. – BOSILOVICH, M. – ENTIN, J. K. – WALKER, J. P. – LOHMANN, D. – TOLL, D.: The Global Land Data Assimilation System. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(3):381–394, 2004. ISSN 0022-1694.

GGP ISDC: Global Geodynamic Project Information System and Data Center, online. URL <http://ggp.gfz-potsdam.de/>.

Zoznam publikovaných prác z danej problematiky

MIKOLAJ, M. – MEURERS, B.: Vplyv snehu na variáciu tiažového zrýchlenia na observatóriu Conrad. In *Juniorstav 2013 : 15. Odborná konferencia doktorského studia*, s. 1–6, 2013. ISBN 978-80-214-4670-0.

ZÁHOREC, P. – PAPČO, J. – MIKOLAJ, M. – PAŠTEKA, R.: Použitie vertikálnych gradientov tiažového zrýchlenia v referenčných gravimetrických sieťach. In *Využitie moderných geodetických technológií v súčasných geodetických referenčných systémoch*, s. 151–157, 2012. ISBN 978-80-89626-00-7.

MIKOLAJ, M.: Odhad presnosti určenia korekcií absolútnych gravimetrických meraní. In *Juniorstav 2012 : 14. Odborná konferencia doktorského studia*, s. 1–6, 2012. ISBN 978-80-214-4393-8.

MIKOLAJ, M. – MOJZEŠ, M.: Hydrological effect on absolute gravity measurements using the model GLDAS. *Reports on Geodesy*, 91(2):97–102, 2011. ISSN 0867-3179.

MOJZEŠ, M. – MIKOLAJ, M.: Hydrologický signál v geodetických meraniach. In *Transport vody, chemikálií a energie v systéme pôda-rastlina-atmosféra*, s. 502–513, 2011. ISBN 978-80-89139-26-2.

MOJZEŠ, M. – MIKOLAJ, M.: Repeated absolute gravity measurements in the area of Slovakia. In *Terrestrial gravimetry: Static and mobile measurements: IAG symposium*, s. 108–111, 2011. ISBN 978-5-91995-017-2.

MIKOLAJ, M.: Možnosti využitia globálneho hydrologického modelu GLDAS pre korekciu gravimetrických meraní. In *Juniorstav 2011 : 13. Odborná konferencia doktorského studia*, s. 1–6, 2011. ISBN 978-80-214-4232-0.

MOJZEŠ, M. – MIKOLAJ, M.: Modelling of hydrological mass variation on the site Modra-Piesok. In *Reports on Geodesy. Proceedings of the EGU G13 symposium: Geodetic and geodynamic programmes of the Central Europe*, number 1, s. 21–25, 2010. ISBN 978-83-85287-87-2.