Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta

Ing. Branislav Hábel

Autoreferát dizertačnej práce

ANALÝZA DLHODOBÝCH MERANÍ SUPRAVODIVÝM GRAVIMETROM

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. Branislav Hábel
Katedra geodetických základov
Stavebná fakulta, STU v Bratislave
Radlinského 11, 813 68 Bratislava

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

Oponenti: prof. Ing. Pavel Novák, PhD.
Katedra matematiky
Fakulta aplikovaných věd, Západočeská univerzita v Plzni
Univerzitní 22, 306 14 Plzeň

doc. Ing. Antonín Zeman, DrSc.
Katedra vyšší geodézie
Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

RNDr. Ladislav Brimich, CSc.
Geofyzikálny ústav SAV
Slovenská akadémia vied
Dúbravská cesta 9, 845 28 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný: .....

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

.....
prof. Ing. Alojz Kopáčik, PhD.
dekan Stavebnej fakulty STU
Radlinského 11, 813 68 Bratislava

Obsah

Úvod **1**

1 Ciele dizertačnej práce **2**

2 Súčasný stav riešenej problematiky **2**

2.1 Supravodivý gravimeter 2

2.2 Gravimetrické merania - hlavné zložky a možnosti ich modelovania 3

2.3 Súčasný postup predspracovania gravimetrických meraní 4

2.4 Slapová analýza a súčasné možnosti 6

3 Metodika práce a metódy skúmania - numerický experiment **7**

3.1 Stanovenie objektívneho postupu a metód homogenizovaného spracovania gravimetrických meraní 7

3.1.1 Odstránenie odľahlých meraní a zemetrasení 8

3.1.2 Odstránenie skokov 9

3.1.3 Interpolácia gravimetrických meraní a pozorovaní atmosférického tlaku 10

3.1.4 Filtrovanie a prevzorkovanie gravimetrických meraní a pozorovaní atmosférického tlaku 12

3.2 Testovanie funkčnosti navrhnutých metód na syntetických a reálnych meraniach 13

3.3 Aplikovanie navrhnutých metód spracovania gravimetrických meraní na vybranú sieť SG 14

3.4 Slapová analýza - odhad slapových parametrov 16

3.4.1 Pozorované slapové parametre 16

3.4.2 Opravené slapové parametre 17

3.4.3 Porovnanie opravených slapových parametrov s teoretickými modelmi 19

3.4.4 Analýza reziduálnych vektorov 20

4 Prínosy dizertačnej práce pre vedu a prax **21**

5 Záver **22**

Summary **23**

Literatúra **24**

Zoznam publikovaných prác z danej problematiky **26**

Úvod

Cieľom gravimetrie ako samostatnej vednej disciplíny je určovanie parametrov tiažového poľa Zeme, príp. iných nebeských telies ako funkcie polohy a času, a to prostredníctvom merania zrýchlenia voľného pádu alebo jeho prvých derivácií (*Janák, 2010*). Využívajú sa absolútne alebo relatívne metódy merania realizované pomocou gravimetrov.

Do osobitnej kategórie staničných relatívnych gravimetrov možno zaradiť supravodivý gravimeter (SG). Špecifická konštrukcia meracieho systému zabezpečuje dlhodobú stabilitu a vysokú presnosť meraných zmien tiažového zrýchlenia. To ho predurčuje ako ideálny nástroj slúžiaci na štúdium rôznych geodynamických a geofyzikálnych javov, ktorých vplyvy sú v gravimetrických meraniach prítomné. Vo všeobecnosti sa jedná o účinky slapových javov, pohyb pólu, zmenu uhlovej rýchlosti rotácie Zeme, variáciu atmosférického tlaku, presun terestrických hmôt a environmentálny šum. Oddelenie jednotlivých zložiek signálu si vyžaduje aplikovanie rôznych modelov a špeciálnych postupov spracovania. Niektoré z uvedených javov vieme pomerne presne modelovať, iné zase v meraniach SG podrobujeme analýzam. V práci sa zameriame na slapovú zložku, ktorá je v gravimetrických meraniach prítomná dominantným spôsobom.

Obzvlášť veľkú pozornosť treba venovať predspracovaniu gravimetrických meraní SG na účely následných analýz. Tie pomerne často obsahujú rôzne typy porúch alebo prerušenia, ktoré je potrebné eliminovať. Súčasné nástroje umožňujúce opravu takýchto porúch využívajú prístup „remove-restore“ spočívajúci vo výpočte reziduálneho signálu modelovaním vplyvu slapov a variácie atmosférického tlaku na tiažové zrýchlenie (*Hinderer a kol., 2007*). Problematickým môže byť práve krok spočívajúci vo výpočte presného slapového signálu. Na tento účel môžeme použiť teoretické slapové modely alebo výsledky slapovej analýzy aplikovanej priamo na realizované gravimetrické merania. Prvý prístup je závislý na presnosti použitých modelov a je otázne, do akej miery tieto modely opisujú skutočné slapové deformácie Zeme a nepriamy efekt oceánskych slapov. V druhom prípade vystupujú do popredia nedostatky v kalibrácii relatívnych gravimetrov vrátane SG, ktoré majú zásadný vplyv na presnosť odhadnutých slapových parametrov.

Vzájomné porovnanie gravimetrických meraní medzi viacerými SG je možné práve prostredníctvom výsledkov slapových analýz, kde teoretický slapový signál známy s vysokou presnosťou možno chápať ako určitú referenciu. Potom porovnanie slapových parametrov medzi jednotlivými stanicami dovoľuje stanoviť globálnu kalibračnú chybu SG a testovať teoretické slapové modely. Nevyhnutným krokom je však stanovenie jednotnej stratégie prípravy gravimetrických meraní SG na účely slapovej analýzy, ktorý zabezpečuje objektivitu spracovania od vyhľadania porúch až po samotný odhad slapových parametrov Spôsob predspracovania gravimetrických meraní sa totiž medzi jednotlivými operátormi SG môže značne líšiť, na čo bolo poukázané v (*Hinderer a kol., 2007*).

V práci navrhneme postup a metódy umožňujúce homogenizované spracovanie gravimetrických meraní spolu s pozorovaniami atmosférického tlaku, ktoré následne aplikujeme na vybranú skupinou SG, ktoré sú súčasťou Globálneho geodynamického projektu (GGP). Tie sú lokalizované v strednej a západnej Európe. Nadobudnuté výsledky a závery tak budú všeobecne uplatniteľné pri realizácii absolútnych, ale aj relatívnych gravimetrických meraní v širšom regionálnom rozsahu.

1 Ciele dizertačnej práce

Hlavným cieľom dizertačnej práce je návrh objektívnej homogenizačnej metódy aplikovateľnej na merania realizované supravodivým gravimetrom a jej použitie na slapové analýzy.

Čiastkové ciele:

- prehľad súčasných postupov predspracovania a ich možnosti aplikovania na gravimetrické merania realizované supravodivým gravimetrom,
- prehľad súčasných metód slapových analýz,
- stanovenie objektívneho postupu a metód homogenizovaného spracovania gravimetrických meraní a ich testovanie na syntetických a reálnych meraniach supravodivého gravimetra,
- homogenizácia gravimetrických meraní vo vybranej sieti supravodivých gravimetrov,
- analýza súčasných modelov oceánskych slapov na korekciu slapových parametrov,
- použitie geofyzikálnych modelov Zeme na určenie teoretických hodnôt slapových parametrov,
- analýza slapových parametrov z hľadiska polohy staníc supravodivých gravimetrov a ich dosahovanej presnosti.

2 Súčasný stav riešenej problematiky

2.1 Supravodivý gravimeter

SG je charakteristický špecifickou konštrukciou meracieho systému. Na rozdiel od klasických pružinových gravimetrov, kedy je testovacia hmota zavesená na pružine, merací systém SG využíva levitáciu supravodivej sféry v ultrastabilnom magnetickom poli. Hlavnými prednosťami realizovaných gravimetrických meraní potom sú vysoká presnosť (citlivosť), dlhodobá časová stabilita, jednoducho modelovateľný lineárny chod a široký frekvenčný rozsah sledovaných zmien tiažového zrýchlenia. Navyše je dosahovaný vysoký pomer medzi meraným signálom a jeho šumom. V časovej oblasti je presnosť meraní 0.05 μGal (0.5 $nm.s^{-2}$) a vyššia v závislosti od úrovne environmentálneho šumu na stanovisku, pričom prístrojový chod dosahuje rádovo niekoľko μGal/rok (*Neumeyer, 2010*). Meracie vlastnosti a schopnosti SG sú závislé aj na jeho umiestnení hľadiska geografickej polohy a stability. Vo všeobecnosti by umiestnenie gravimetra malo byť volené takým spôsobom, aby bolo možné získať čo najviac informácií z meraného signálu o skúmanom jave.

Proces kalibrácie možno považovať za jeden z najdôležitejších, ale aj najnáročnejších úkonov spojených s aplikáciou meraní SG. Presnosť určenia kalibračných parametrov totiž limituje využitie gravimetrických meraní na ďalšie analýzy. V súčasnosti sa určenie kalibračného faktora vykonáva najčastejšie porovnaním SG s absolútnymi gravimetrickými meraniami v pravidelných časových intervaloch. S použitím absolútneho gravimetra FG5 je možné dosiahnuť relatívnu presnosť až na úrovni 0.1 % (*Francis, 1997*). Fázový posun alebo časové oneskorenie charakterizuje spätnú odozvu meracieho systému na zmenu tiažového zrýchlenia a je určované nezávisle od kalibračného faktora. Dosahovaná presnosť kalibrácie je lepšia ako 0.01s (*Van Camp a kol., 2000*).

Od roku 1997 sú SG začlenené do Globálneho geodynamického projektu (GGP), ktorého cieľom je presné monitorovanie zmien tiažového poľa Zeme a tvorba štandardov na získavanie, spracovávanie a zdieľanie dát (*Crossley a kol., 1999; Hinderer a Crossley, 2004*). Medzi hlavné výhody GGP patrí možnosť komplexného využívania gravimetrických meraní a doplnkových informácií z viacerých SG, čo umožňuje vykonávať výskum aj na regionálnej alebo globálnej úrovni. V súčasnosti má GGP celosvetové pokrytie s viac ako 31 SG rôzneho typu.

Ťažisko poskytovaných dát v rámci projektu GGP predstavujú gravimetrické merania so vzorkovacou periódou 1 min a ďalšie doplnkové informácie (atmosférický tlak, výška hladiny podzemnej vody, zrážky, náklon SG, teplota, vlhkosť vzduchu, pôvod porúch a prerušení, čas údržby, atď.). Dáta sú k dispozícii prostredníctvom webovej služby ISDC (Information System and Data Center) (*ISDC, online*). Gravimetrické merania sú poskytované v rôznej forme v závislosti od spôsobu vykonaného predspracovania, ktorého cieľom je oprava porúch alebo zmena vzorkovacej periódy. Oprava zahŕňa interpoláciu medzier a odstránenie skokov. Prednostný prístup k všetkým typom uvedených dát má samotná GGP komunita. Sprístupnenie ďalším užívateľom nastáva približne s jednoročným oneskorením. Medzi hlavné nedostatky projektu GGP patrí absencia dodatočných informácií týkajúcich sa histórie kalibračných parametrov a ich aktuálnosti alebo detailný opis postupov odstraňovania porúch. To môže značnej miery obmedzovať využiteľnosť databázy GGP.

2.2 Gravimetrické merania - hlavné zložky a možnosti ich modelovania

Gravimetrický signál meraný SG obsahuje spoločný účinok pôsobenia prírodných a antropogénnych javov rôznorodého pôvodu, ktorý sa odzrkadľuje v časových zmenách tiažového zrýchlenia. V zásade možno základný model meraní SG vyjadriť podľa (*Hinderer a kol., 2007*)

$$\begin{aligned} g = \; & g_{slapy\ Zeme\ a\ oceánske\ slapy} + g_{atmosférický\ tlak} + g_{pohyb\ pólu+\mathrm{LOD}} + g_{hydrológia} + \ldots \\ & \ldots + g_{prístrojový\ chod} + g_{poruchy} + g_{reziduálny\ časový\ rad\ (šum,\ldots)} \end{aligned}, \quad (2.1)$$

kde medzi principiálne zložky meraného signálu, ktoré je možno analyzovať alebo modelovať, patria najmä slapy Zeme a oceánske slapy, vplyv variácie atmosférického tlaku na tiažové zrýchlenie, pohyb pólu, zmena uhlovej rýchlosti rotácie Zeme a hydrológia.

Dominantnú časť gravimetrických meraní tvoria zmeny tiažového zrýchlenia zapríčinené slapovými javmi v dôsledku gravitačného pôsobenia Mesiaca, Slnka a ostatných planét. Sprievodným javom sú slapové deformácie zemského telesa a dodatočné presuny hmôt v moriach a oceánoch. Modelovanie účinkov slapov na rôzne merané veličiny pre pevnú nedeformovateľnú Zem sa realizuje prostredníctvom slapového potenciálu vypočítaného na základe slapových katalógov. Katalógy obsahujú rozklad slapového potenciálu na harmonické členy v podobe slapových vĺn, ktorých sumáciou dostávame výsledný slapový potenciál v danom mieste. Podľa frekvencií jednotlivých slapových vĺn potom rozlišujeme dlhoperiodické, denné a poldenné slapové spektrum. Slapový účinok je závislý od zemepisnej šírky stanoviska a zapríčiňuje zmeny tiažového zrýchlenia v rozsahu 1000 až 2000 nm.s^{-2}. Efekt oceánskych slapov je spôsobený presunom oceánskych hmôt, ktoré generujú gravitačný účinok a periodicky zaťažujú oceánsku kôru. Oceánske slapy majú rovnaké frekvencie ako slapy pevnej Zeme s charakteristickými poldennými periódami. To znamená, že v rámci slapových analýz je ich efekt zahrnutý v odhade slapových parametrov

a dosahuje 1 až 10 % efektu slapov pevnej Zeme v závislosti od polohy stanoviska (*Hinderer a kol., 2007*). V súčasnosti je k dispozícii viacero modelov na výpočet korekcie oceánskych slapov založených na rôznych princípoch (*OTLP, online*). Ich najväčšie nedostatky sa prejavujú najmä v pobrežných oblastiach. Vo všeobecnosti je však relatívna presnosť výpočtu na úrovni 2 až 5 % ich celkového účinku.

Presuny atmosférických hmôt zaťažujú zemský povrch a generujú dodatočný gravitačný účinok, ktorý je rovnako viditeľný v zmenách tiažového zrýchlenia meraných SG. V princípe možno vzájomný vzťah medzi zmenou tiažového zrýchlenia a atmosférického tlaku vyjadriť pomocou lineárneho regresného parametra, ktorý pre vnútrozemské stanice nadobúda približnú hodnotou -3 $nm.s^{-2}$/hPa. Účinok môže dosahovať až 10 % meraného signálu. V skutočnosti je tento vplyv frekvenčne závislý. Až 90 % celkového efektu pochádza z územia približne do 50 km od stanoviska (lokálna zóna). V prípade, že chceme uvážiť aj vplyv regionálnej a globálnej zóny, musíme poznať meteorologické informácie zo širšieho okolia vrátane topografie územia. Na výpočet presných korekcií možno použiť 2D (*Farrell, 1972*) alebo 3D modely (*Neumeyer a kol., 2004*).

Časové zmeny vektora rotácie Zeme možno opísať pohybom pólu a zmenou dĺžky dňa LOD (Length of Day), ktoré majú vplyv na odstredivú zložku tiažového zrýchlenia. Pohyb pólu predstavuje detekovateľný efekt v meraniach SG, hoci nadobúda amplitúdu len okolo 50 $nm.s^{-2}$ s charakteristickou Chandlerovou periódou 435 dní. Samotný účinok pohybu pólu na tiažové zrýchlenie je však viditeľný až po odstránení dominantnej slapovej zložky signálu a vplyvu variácie atmosférického tlaku. Taktiež záleží od kvality realizovaných meraní a charakteru stanoviska. Vplyv zmeny uhlovej rýchlosti rotácie Zeme je relatívne veľmi malý (< 1 $nm.s^{-2}$) a oprava nadobúda význam iba pri obzvlášť presných meraniach.

Akumulácia vody a jej rozmiestnenie v okolí SG spôsobuje zmeny tiažového zrýchlenia s hodinovými až ročnými periódami. Jedná sa o pomerne zložitý jav, ktorý v sebe zlučuje účinky dažďových a snehových zrážok, zmeny hladiny podzemnej vody a vlhkosti pôdy vrátane odtoku vody z územia a jej vyparovania. Účinky hydrologických hmôt na tiažové zrýchlenie možno posudzovať v závislosti od vzdialenosti gravimetra. Lokálna hydrologická zóna zahŕňa pôsobenie hmôt do vzdialenosti 1 km. Experimenty však dokazujú, že viac ako 90 % celkového vplyvu majú za následok hydrologické hmoty vo vzdialenosti do 100 m od stanoviska (*Pálinkáš a kol., 2010*). Vplyv regionálnej zóny (1 až 1000 km) a globálnej zóny (> 1000 km) odráža sezóne a sekulárne variácie hydrologických hmôt. Na modelovanie sezónnych variácií sa používajú globálne modely ako Land Dynamics (*Milly a Shmakin, 2002*), WGHM (*Döll a kol., 2003*) alebo GLDAS (*Rodell a kol., 2004*).

Reziduálny časový rad získame odstránením spomínaných zložiek z gravimetrických meraní. Ten je potom možné použiť na skúmanie ostatných javov, ktoré spôsobujú zmeny tiažového zrýchlenia a nie sú v meranom signále také výrazné. Dôležité je, aby boli vopred eliminované všetky poruchy signálu, ktoré nemajú geofyzikálny charakter. Reziduálny časový rad potom obsahuje najmä účinky hydrológie, redistribúcie terestrických hmôt alebo zvyšky odpovedajúce prítomnosti atmosférického tlaku, ktoré neeliminoval približný regresný parameter.

2.3 Súčasný postup predspracovania gravimetrických meraní

Gravimetrické merania vykonané SG si vyžadujú dôkladné predspracovanie na ďalšie skúmanie a analýzy. Procedúra prvotného spracovávania neupravených „surových“ dát sa však

môže odlišovať medzi jednotlivými operátormi SG. Merané zmeny tiažového zrýchlenia sú pomocou antialiasing filtra digitalizované so vzorkovacou periódou 1, 2, 5 alebo 10 s. Doplnkové údaje majú obyčajne väčší časový krok, napr. 10 s pre záznam pozorovaní atmosférického tlaku na stanici SG (*Hinderer a kol., 2007*). Používanie 1 s meraní má svoje opodstatnenie hlavne pri skúmaní vlastných kmitov Zeme v seizmológii alebo v prípade iných vysokofrekvenčných javov. V geodézii a v geofyzike však postačujú dáta s väčšou vzorkovacou periódou. Z tohto dôvodu sa vykonáva prevzorkovanie 1 s meraní na 1 min s použitím príslušného digitálneho low-pass filtra a odstránenie porúch. Ďalej nasleduje prevzorkovanie 1 min meraní na 1 h. Rovnako to platí aj v prípade atmosférického tlaku. Súčasťou spracovania je aj kalibrácia záznamov, nakoľko merané zmeny tiažového zrýchlenia a atmosférického tlaku sú prvotne zaznamenávané v jednotkách volt.

Presnosť meraní je degradovaná poruchami prístrojového pôvodu a zemetraseniami. Preto ich detekcii a odstraňovaniu venujeme zvýšenú pozornosť. V princípe je možné tieto poruchy rozdeliť do štyroch základných skupín podľa ich charakteru (*Van Camp a Vauterin, 2005*):

- ODĽAHLÉ MERANIA – počas krátkeho časového úseku dochádza k výraznému odchýleniu meraní od predpokladaných hodnôt, čo má hlavne prístrojový pôvod.
- ZEMETRASENIA – spôsobujú veľmi prudké vychýlenie signálu v dĺžke až niekoľkých hodín, počas ktorých ešte doznievajú vlastné kmity Zeme. V určitých prípadoch dochádza k prerušeniu merania.
- SKOKY – gravimetrický signál sa náhle zmení bez akejkoľvek geofyzikálnej príčiny a ostáva stabilný v novej polohe, čo skresľuje dlhoperiodické zložky signálu vrátane prístrojového chodu.
- MEDZERY – prerušenia meraní v dôsledku výpadku systému zberu dát SG z dôvodu údržby, búrok, výpadku elektrickej energie alebo prírodných katastrof.

Odstránenie porúch v gravimetrických meraniach sa najčastejšie vykonáva metódou „remove-restore“, ktorá pozostáva z niekoľkých následných krokov (*Hinderer a kol., 2007*). Najskôr sa z meraného signálu odstráni teoretický vplyv slapov a variácie atmosférického tlaku na tiažové zrýchlenie. Na zvyšný reziduálny signál sa aplikujú nástroje eliminujúce vyššie spomenuté poruchy. V poslednej fáze sa odstránená časť opäť pridá k už opravenej reziduálnej zložke. Najjednoduchším spôsobom, ako vykonať opravu signálu, je odstrániť odľahlé merania alebo zemetrasenia zavedením prerušení. Na druhej strane, častý výskyt medzier spôsobuje pri prevzorkovávaní 1 s alebo 1 min meraní neželanú stratu údajov z dôvodu aplikovania filtra. Preto je v určitých situáciách výhodné interpolovať chýbajúce merania. Zložitejšia situácia nastáva v prípade eliminácie skokov. Ich odstránenie môže byť pomerne náročné, pretože je ťažké rozlíšiť medzi skokmi spôsobenými prístrojom alebo náhlou zmenou tiažového zrýchlenia napr. v dôsledku prudkých zrážok alebo topenia snehu (*Meurers a kol., 2007*). Malé skoky zapríčinené elektronikou prístroja dosahujú asi 5 $nm.s^{-2}$, plnenie hélia 100-200 $nm.s^{-2}$ a silné búrky až okolo 1000 $nm.s^{-2}$ (*Hinderer a kol., 2007*). Oprava meraní SG je v prvom rade subjektívnou činnosťou, ktorej výsledok v prevažnej miere závisí od prístupu príslušného operátora SG. Niektoré kroky je možné vykonať automatizovane s použitím dostupných softvérov. V súčasnej dobe patria medzi najpoužívanejšie programový balík ETERNA (*Wenzel, 1996*) a program TSOFT (*Van Camp a Vauterin, 2005*).

2.4 Slapová analýza a súčasné možnosti

Slapová analýza pozostáva z určenia pozorovaných amplitúdových faktorov δ a fázových posunov α pre skupinu slapových vĺn charakteristických blízkymi frekvenciami na základe vykonaných gravimetrických meraní. Bezrozmerné amplitúdové faktory sú definované pomerom A/A_{th}, kde A predstavuje skutočnú amplitúdu danej slapovej vlny určenú slapovou analýzou a A_{th} je jej teoretická hodnota vztiahnutá k pevnej nedeformovateľnej Zemi bez oceánov podľa definície astronomických slapov (slapový katalóg). Ich pomer A/A_{th} potom odráža ďalšie zmeny tiažového zrýchlenia spôsobené slapovou deformáciou Zeme a oceánskymi slapmi. Teoretické hodnoty slapových parametrov je možné získať z rôznych modelov Zeme opisujúcich jej odozvu na pôsobenie slapov (*Dehant a kol. 1999; Mathews, 2001*), pričom teoretické amplitúdové faktory δ_{th} vyjadrujú iba slapovú deformáciu Zeme bez oceánov. Teoretické fázové posuny α_{th} vzhľadom na dosahovanú veľkosť možno zanedbať.

Pozorované slapové parametre tvoria zložky slapového vektora **A** (A, α), príp. **A** ($\delta.A_{th}$, α), ktorý je schematicky znázornený na obr. 2.1. Teoretický slapový vektor **R** ($\delta_{th}.A_{th}$, 0) je definovaný podobným spôsobom. Vektor oceánskych slapov **L** (L, λ) tvorený amplitúdou L a fázou λ vztiahnutou k lokálnemu meridiánu je rovnako obsiahnutý v pozorovanom slapovom vektore **A**. Jeho odstránením získame opravený slapový vektor $\mathbf{A}_c$ (A_c, α_c), pre ktorý podľa (*Ducarme a kol., 2009*) platí

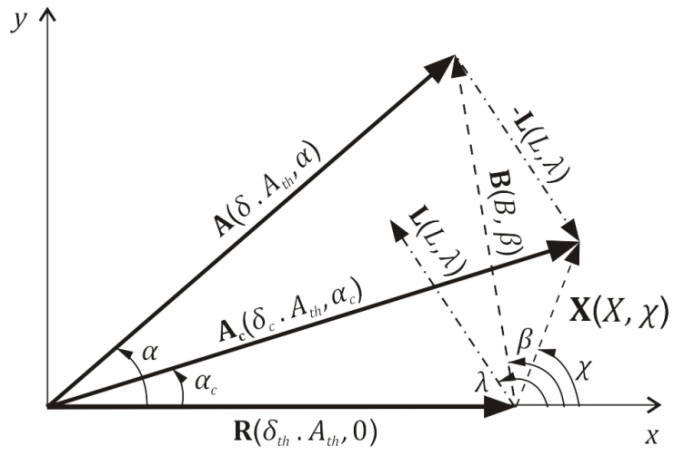
$$\mathbf{A}_c(\delta_c \cdot A_{th}, \alpha_c) = \mathbf{A} - \mathbf{L}, \tag{2.2}$$

kde δ_c je opravený amplitúdový faktor. Z porovnania pozorovaného a teoretického slapového vektora a vektora oceánskych slapov možno vypočítať reziduálne vektory **B** a **X** (obr. 2.1) podľa

$$\mathbf{B}(B, \beta) = \mathbf{A} - \mathbf{R}, \tag{2.3}$$

a

$$\mathbf{X}(X, \chi) = \mathbf{B} - \mathbf{L}. \tag{2.4}$$



Obr. 2.1 Znázornenie pozorovaného slapového vektora **A** (A, α), teoretického slapového vektora **R** ($\delta_{th}.A_{th}$, 0), vektora oceánskych slapov **L** (L, λ) a reziduálnych vektorov **B** (B, β) a **X** (X, χ) podľa (*Neumeyer a kol., 2005*)

Analýza reziduálnych vektorov dovoľuje študovať nedokonalosti modelov oceánskych slapov spolu s kalibračnými chybami SG. Uvedené definície aplikujeme v numerickom experimente.

V súčasnosti sa používajú dva základné prístupy k slapovým analýzam, ktoré využívajú na odhad slapových parametrov metódu najmenších štvorcov (MNŠ) a sú implementované aj v dostupných softvéroch:

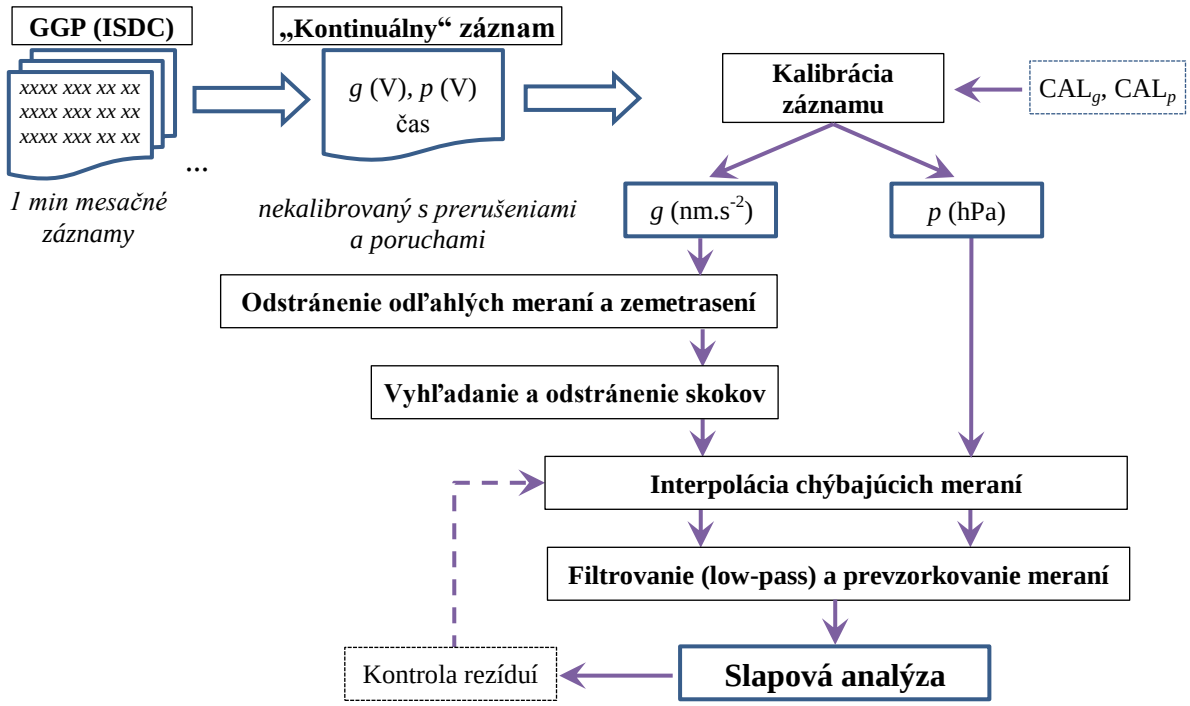
- CHOJNICKÉHO KONCEPCIA (*Chojnicky, 1973*): program ANALYZE z balíka ETERNA (*Wenzel, 1996*),
- VENEDIKOVOVA KONCEPCIA (*Venedikov, 1966*): program VAV05 (*Venedikov, 2005*).

Odlišná filozofia je aplikovaná v programe BAYTYP-G (*Tamura a kol., 1991*), ktorý je založený na Bayesovskej štatistike (*Harrison a Stevens, 1976*). K významným rozdielom odhadnutých slapových parametrov podľa uvedených koncepcií nedochádza. Zásadne sa však môžu líšiť ich charakteristiky presnosti. Program ANALYZE patrí v súčasnosti k najpoužívanejším nástrojom na vykonanie slapovej analýzy.

3 Metodika práce a metódy skúmania - numerický experiment

3.1 Stanovenie objektívneho postupu a metód homogenizovaného spracovania gravimetrických meraní

Cieľom bolo navrhnúť taký postup predspracovania gravimetrických meraní, ktorý by si vyžadoval poznať minimum vstupných informácií, bol by všeobecne aplikovateľný a zabezpečoval by objektivitu spracovania s minimálnym zásahom užívateľa. Ďalej uvedené postupy a metódy sú primárne navrhnuté na nekorigované gravimetrické merania so vzorkovacou periódou 1 min, ktoré sú poskytované v rámci projektu GGP. Metódy sú však ľahko modifikovateľné aj na iné typy dát s rozdielnou vzorkovacou periódou. Navrhnutá schéma homogenizovaného predspracovania údajov je znázornená na obr. 3.1. Základný princíp jednotlivých krokov bude vysvetlený ďalej v texte.



Obr. 3.1 Navrhnutý postup predspracovania gravimetrických meraní a pozorovaní atmosférického tlaku

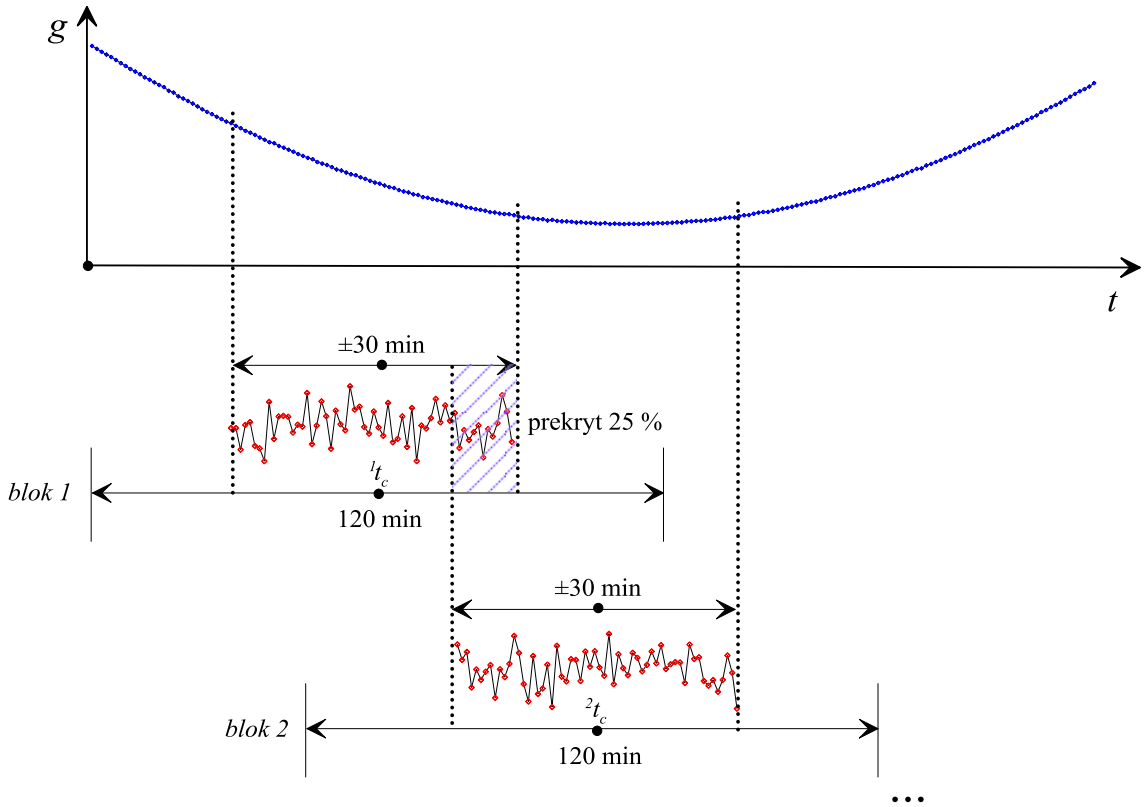
3.1.1 Odstránenie odľahlých meraní a zemetrasení

Odľahlé merania sú zväčša prístrojového pôvodu a v signáli sa vyskytujú náhodne. Za odľahlé hodnoty možno považovať aj prudký rozptyl signálu spôsobený zemetrasením a následným doznievaním vlastných kmitov Zeme. V takomto prípade sa jedná o súvislý blok výrazne vybočujúcich hodnôt v dĺžke až niekoľkých hodín. Výhodné je, že odľahlé merania sú v oboch prípadoch veľmi jednoducho identifikovateľné aj bez výpočtu rezíduí podľa definície „remove-restore“. Vyhľadanie pozostáva z troch základných krokov:

I. Rozdelenie gravimetrických meraní do blokov s dĺžkou 120 min (obr. 3.2). Konečné vyhľadanie sa potom vykoná v intervale ±30 min od centrálneho času t_c analyzovaného bloku. Kontinuita vyhľadávania v rámci celého záznamu je zabezpečená vzájomným prekrytom susedných blokov (25 %).

II. Stanovenie optimálneho stupňa regresného polynómu, ktorý dostatočne v danom bloku aproximuje trendovú zložku a výpočet rezíduí meraných hodnôt. Návrh optimálneho stupňa je realizovaný pomocou koeficientu determinácie R^2 (*Rousseeuw a Leroy, 1987*).

III. Vyhľadanie odľahlých hodnôt uplatnením princípu robustného vyrovnania aplikovaného na rezíduá meraných hodnôt v centrálnej časti bloku ±30 min od t_c (*Rousseeuw a Leroy, 1987*).



Obr. 3.2 Rozdelenie gravimetrických meraní do blokov s prekrytom

Dodatočná podmienka pre maximálnu štandardnú odchýlku rezíduí v danom bloku, ktorá nesmie byť prekročená, zabezpečuje aj detekciu súvislých blokov meraní poškodených zemetraseniami. Odpadá tak potreba manuálneho prehľadávania gravimetrických meraní, čo je pomerne prácny a časovo náročný úkon. Navyše odľahlé hodnoty sú vyšetrované aj na možnú prítomnosť jednoduchých skokov tak, aby nedošlo k nadbytočnému vylúčeniu meraní v ich okolí.

3.1.2 Odstránenie skokov

Návrh metódy určenej na vyhľadávanie skokov v gravimetrických meraniach je inšpirovaný prístupmi uvedenými napr. v (*Solow, 1987; Lund a Reeves, 2002*) aplikovanými najmä v meteorológii a klimatológii. V našom prípade sa zameriame na identifikáciu náhlych zmien trendovej zložky gravimetrických meraní, ktorá v prevažnej miere odpovedá variáciám tiažového zrýchlenia spôsobených slapmi. K takýmto zmenám dochádza v tzv. bodoch nespojitosti, ktorých polohu a veľkosť v zázname je našim cieľom určiť. Testovania na prítomnosť skoku v okamihu t_c sa vykonáva v bloku gravimetrických meraní s dĺžkou 120 min a spočíva v porovnaní nespojitého a spojitého regresného modelu

$$ {}^{n}Y_t = \begin{cases} a_1 + b_1 t + c_1 t^2 + \ldots + \varepsilon_t & t_c - 60\text{min} \le t < t_c \\ a_2 + b_2 t + c_2 t^2 + \ldots + \varepsilon_t & t_c \le t \le t_c + 60\text{min} \end{cases} \tag{3.1} $$

a

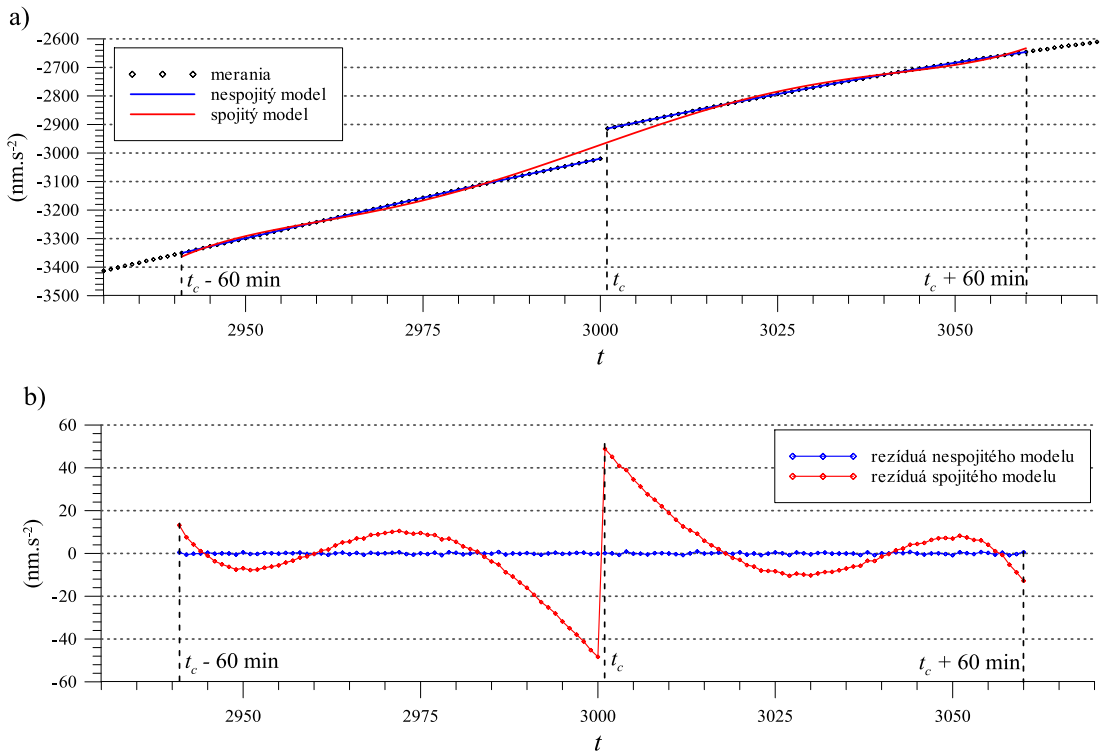
$$ {}^{s}Y_t = a + bt + ct^2 + \ldots + \varepsilon_t\,, \qquad t_c - 60\,\text{min} \le t \le t_c + 60\,\text{min}\,, \tag{3.2} $$

kde a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2..., a, b, c,... sú parametre regresnej funkcie a ε predstavuje náhodné chyby meraní. Optimálny stupeň pre modely (3.1) a (3.2) je stanovený obdobne ako pri vyhľadávaní odľahlých meraní a zemetrasení pomocou koeficientu determinácie R^2 (*Rousseeuw a Leroy, 1987*). Potom pre rezíduá odpovedajúce nespojitému, resp. spojitému modelu platí

$$ {}^{n}res_t = y_t - {}^{n}\hat{Y} \tag{3.3} $$

a

$$ {}^{s}res_t = y_t - {}^{s}\hat{Y}_t\,. \tag{3.4} $$



Obr. 3.3 Princíp vyhľadania skoku v gravimetrických meraniach pomocou spojitého a nespojitého modelu

Ako vyplýva z obr. 3.3a a 3.3b, poloha skoku odpovedá najväčším rozdielom medzi oboma modelmi. Mieru tejto nezhody možno vyčísliť pomocou vhodne zvolenej testovacej štatistiky T_c odpovedajúcej času t_c, pre ktorú platí

$$T_c = \frac{({}^s res_t)^2 - ({}^n res_t)^2}{({}^n res_t)^2} \,. \tag{3.5}$$

Testovanie vychádza z predpokladu, že v každom jednom čase, kedy bolo uskutočnené meranie, mohol nastať skok. Preto je potrebné hodnotu testovacej štatistiky vyčísliť pre každý jeden okamih merania v rámci celého gravimetrického záznamu. Jej najväčšie hodnoty potom odpovedajú prítomnosti pravdepodobných skokov.

Ak polohu skoku v meraniach už poznáme, potom je potrebné určiť jeho veľkosť. Vychádzať budeme z predpokladu, že všetky merania v čase $t_c \le t \le t_c + 60\,\mathrm{min}$ sú ovplyvnené konštantnou veľkosťou skoku. Použijeme analogický postup ako pri vyhľadávaní jeho polohy pomocou spojitého (3.1) a nespojitého (3.2) modelu. V tomto prípade však aplikujeme opačný postup s cieľom minimalizovať hodnotu testovacej štatistiky (3.5) vypočítanej v danom bloku meraní. To dosiahneme konštantným posunom meraní v okamihoch $t_c \le t \le t_c + 60\,\mathrm{min}$ v príslušnom smere o hodnotu 0.1 nm.s^{-2}, pričom sa vykoná nové porovnanie spojitého a nespojitého modelu pomocou testovacej štatistiky T_c. Postup sa opakuje, až kým nie je dosiahnutá jej minimálna hodnota.

3.1.3 Interpolácia gravimetrických meraní a pozorovaní atmosférického tlaku

Našim cieľom bolo navrhnúť taký postup vypĺňania gravimetrických údajov v podobe funkčného algoritmu, ktorý by si nevyžadoval poznať žiadne dodatočné informácie, t.j. slapové parametre a priebeh atmosférického tlaku v danom mieste. Vstupom je vybraný blok gravimetrických meraní **y** v okolí prerušenia a im odpovedajúce časové okamihy **t**. Celkový počet meraní použitých na interpoláciu je rovný štvornásobku dĺžky medzery *m*, pričom polovica meraní je pred a druhá za medzerou. Celý úkon pozostáva z troch na seba nadväzujúcich krokov:

I. Stanovenie optimálneho stupňa regresného polynómu na odstránenie trendovej zložky z bloku gravimetrických meraní, ktorý obsahuje prerušenie pomocou koeficientu determinácie R^2 (*Rousseeuw a Leroy, 1987*) a výpočet predbežných rezíduí **y´**.
II. Určenie parametrov kovariančnej funkcie vstupujúcich do kolokačného modelu pomocou optimalizácie na základe vektora predbežných rezíduí **y´**.
III. Predikcia chýbajúcich gravimetrických meraní metódou kolokácie MNŠ.

Použitie kolokácie MNŠ umožňuje zvýšiť celkovú presnosť interpolácie. Na rozdiel od regresného polynómu zahŕňa kolokačný model aj odhad náhodnej zložky (signál), ktorú nevieme vopred determinovať. Ďalšou výhodu je, že v jednom kroku dokážeme odhadnúť parametre trendu, eliminovať úroveň šumu a predikovať chýbajúce merania (*Moritz a Sünkel, 1978*). Východiskom na zostavenie kolokačného modelu je voľba vhodnej kovariančnej funkcie a niekoľkých ďalších parametrov. Ako vhodné sa ukázalo použitie štvorcovej exponenciálnej kovariančnej funkcie (*Rasmussen a Williams, 2006*). Potom pre prvok úplnej kovariančnej matice $\mathbf{\Sigma}_{yy}$ vyjadrujúci

vzájomný vzťah medzi meraniami v čase t a t' platí

$$\Sigma_{yy}(t,t') = \sigma_s^2 \exp\left[\frac{-(t-t')^2}{2a^2}\right] + \sigma_\varepsilon^2\,\delta(t,t'). \tag{3.6}$$

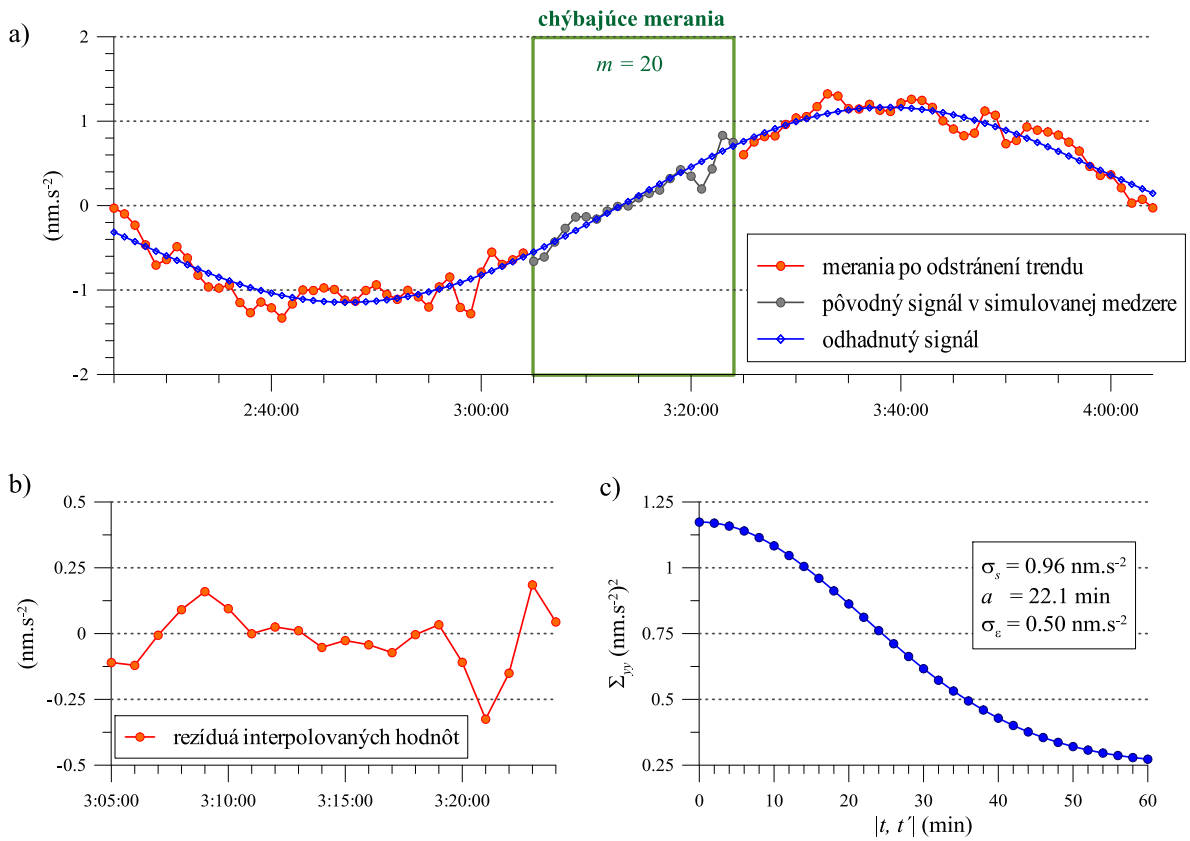
kde σ_s^2 a σ_ε^2 je variancia signálu a náhodných chýb meraní, δ je Kroneckerovo delta a parameter a vyjadruje zmenšovanie kovariancie s narastajúcou časovou vzdialenosťou medzi okamihmi t a t'. Spoľahlivú predikciu možno získať iba vhodnou voľbou týchto parametrov, ktorých hodnoty vopred nepoznáme. Možno ich určiť pomocou empirickej kovariančnej funkcie (*Moritz a Sünkel, 1978*) alebo aplikovaním Bayesovho teorému pravdepodobnosti na vstupné merania (*Rasmussen a Williams, 2006*). Vzhľadom k povahe gravimetrických meraní sa ukázalo, že na určenie parametrov vstupujúcich do kolokácie je výhodnejšie použiť práve druhú metódu. Parameter σ_ε je definovaný ako vopred známy s hodnotou 0.5 nm.s^{-2} na úrovni teoretickej presnosti meraní vykonaných SG (*Neumeyer, 2010*).

Podľa Bayesovho teorému najlepší odhad neznámych parametrov $\vartheta = \{a, \sigma_s\}$ odpovedá najväčšej hodnote podmienenej pravdepodobnosti $p(\mathbf{y}' \mid \mathbf{t}, \vartheta)$, ktorá je podľa (*Rasmussen a Williams, 2006*) daná funkciou

$$\log\ p(\mathbf{y}' \mid \mathbf{t}, \vartheta) = -\frac{1}{2}\mathbf{y}'^T \mathbf{\Sigma}_{yy}^{-1}\mathbf{y}' - \frac{1}{2}\log\left|\mathbf{\Sigma}_{yy}\right| - \frac{n}{2}\log 2\pi\,. \tag{3.7}$$

Hodnotami vstupujúcimi do pravdepodobnostnej funkcie je n-rozmerný vektor predbežných rezíduí $\mathbf{y}'$ a im odpovedajúce okamihy meraní $\mathbf{t}$. Parametre ϑ sú v tomto prípade premennými, ktoré vstupujú do výpočtu kovariančnej matice meraní $\mathbf{\Sigma}_{yy}$ prostredníctvom kovariančnej funkcie (3.6). Cieľom je nájsť také parametre ϑ, ktorým bude odpovedať maximum funkcie (3.7). Maximum je potom možné nájsť pomocou ľubovoľnej optimalizačnej techniky. V algoritme je aplikovaná gradientová metóda. Celý optimalizačný proces je modifikovaný na účel zníženia výpočtového času a spresnenia voľby parametrov kovariančnej funkcie pomocou vhodnej voľby štartovacích bodov. Tie sú nezávisle určované pre každý blok gravimetrických meraní, v ktorom je potrebné vykonať doplnenie chýbajúcich údajov.

Na obr. 3.4a je možné vidieť odhad signálu v meraných aj predikovaných bodoch. Nakoľko sa jedná o ilustračný príklad, priebeh meraní v medzere je známy. To nám umožňuje výpočet rezíduí interpolovaných hodnôt, ktoré sú vykreslené na obr. 3.4b. Ich rozpätie neprekračuje ± 0.5 nm.s^{-2}, z čoho vyplýva, že presnosť predikcie je na úrovni teoretickej presnosti gravimetrických meraní SG. Obr. 3.9c zobrazuje priebeh kovariančnej funkcie v závislosti od časovej vzdialenosti jednotlivých meraní s uvážením variancie náhodných chýb (šumu) na úrovni σ_ε = 0.5 nm.s^{-2}. Uvedený postup má zmysel aplikovať až v prípade dlhších medzier (> 1 min). Väčšina prerušení v zázname je však v dĺžke 1 min. Tieto sú dôsledkom predspracovania gravimetrických meraní, ktoré v sebe zahŕňa odstránenie odľahlých meraní a zemetrasení, príp. skokov. V takomto prípade postačuje použiť jednoduchú lineárnu interpoláciu. Medzery v gravimetrických záznamoch sú potom interpolované postupne od najkratších po najdlhšie.



Obr. 3.4 Výsledky kolokácie MNŠ: (a) predikcia signálu, (b) rozdiel interpolovaných a pôvodných meraní v medzere a (c) priebeh kovariančnej funkcie s uvážením náhodných chýb meraní

Údaje o zmene atmosférického tlaku na stanovisku slúžia v našom prípade ako doplnková informácia, ktorá je použitá až pri odhade slapových parametrov v rámci slapovej analýzy. Chýbajúce hodnoty obyčajne korešpondujú s výpadkami gravimetrických meraní, s ktorými sa nachádzajú v spoločnom zázname. Prerušenia je možné nahradiť pomocou pozorovaní vykonaných na blízkej meteorologickej stanici. V prípade kratších medzier postačuje vykonať predikciu aplikovaním lineárnej regresie. Každá jedna medzera v meraniach je opäť riešená ako samostatný celok a predikcia chýbajúcich hodnôt je vykonaná na základe meraných zmien atmosférického tlaku v okolí prerušenia. Celkový počet meraní použitých na interpoláciu je rovný štvornásobku dĺžky medzery. Optimálny stupeň polynómu, ktorý najlepšie zachytáva priebeh atmosférického tlaku v danom bloku obsahujúcom prerušenie, sa určí opäť pomocou koeficientu determinácie R^2.

3.1.4 Filtrovanie a prevzorkovanie gravimetrických meraní a pozorovaní atmosférického tlaku

Filtrovaním gravimetrických meraní zabezpečíme odstránenie vysokofrekvenčnej zložky signálu, ktorá neodpovedá slapovým javom a považujeme ju za šum. Takto filtrované merania je potom výhodné prevzorkovať na väčšiu časovú periódu, napr. 1 h. Vo všeobecnosti voľba filtra závisí od charakteru javu, ktorý chceme v realizovaných gravimetrických meraniach študovať. V prípade slapovej analýzy preto používame filtre s minimálnym vplyvom na amplitúdy a fázy jednotlivých slapových zložiek v závislosti od ich frekvencií, čo by sa následne prejavilo aj vo výslednom odhade slapových parametrov. Na prevzorkovanie 1 min meraní na 1 h je v GGP

odporúčané použiť symetrický low-pass filter „G1M1H“ s dĺžkou 71.7 h, ktorý obsahuje 4303 koeficientov (*GGP-G1M1H, online*). Filtrovanie meraní je výhodné vykonať v dvoch smeroch. Najskôr sa blok meraní bez prerušení prefiltruje v jednom smere a následne sa spätne prefiltruje v opačnom smere s invertovaným poradím meraní. Výhodou uvedeného postupuje je, že sa eliminuje časový posun filtrovaných hodnôt a zamedzí sa strate dát na oboch okrajoch filtrovaného signálu. Podrobnosti možno nájsť v (*Oppenheim a Schafer, 1989*). Takto filtrované merania sú už vhodné na zväčšenia vzorkovacej periódy. To sa vykoná výberom každej *k*-tej vzorky (merania), kde *k* udáva pomer medzi výstupnou (60 min) a vstupnou vzorkovacou periódou (1 min).

3.2 Testovanie funkčnosti navrhnutých metód na syntetických a reálnych meraniach

Dôležitý krok predstavuje testovanie navrhnutých metód určených na homogenizované spracovanie gravimetrických meraní realizovaných SG spolu s priebehom atmosférického tlaku. Umožní to stanovenie funkčnosti, spoľahlivosti a definovanie limitov použiteľnosti, z ktorých budeme ďalej vychádzať pri predspracovaní záznamov na účely slapovej analýzy. Uvedené postupy boli testované na syntetických (modelových) a reálnych meraniach v závislosti od typu navrhnutej metódy. Metódy slúžiace na vyhľadávanie a odstraňovanie odľahlých meraní, zemetrasení a skokov je výhodné prešetrovať na syntetickom časovom rade, ktorý zahŕňa jednotlivé zložky podľa (2.1) modelované na stanici SG Viedeň (φ = 48.2489°, λ = 16.3565°, h = 192.44 m). Merania neobsahujú akékoľvek poruchy, ktoré by mohli nežiaduco ovplyvniť výsledky testovania. V nich boli následne simulované poruchy so známym priebehom a charakterom. Metódy umožňujúce vypĺňanie medzier boli testované priamo na reálnych gravimetrických meraniach a pozorovaných zmenách atmosférického tlaku na staniciach Viedeň a Wettzell (φ = 49.1440°, λ = 12.8780°, h = 613.70 m). Následným porovnaním interpolovaných hodnôt a skutočných meraní v simulovaných prerušeniach bolo možné stanoviť výslednú presnosť, ktorú navrhnuté interpolačné postupy dosahujú. Z výsledkov testovania vyplývajú nasledovné závery:

- Priemerná efektivita vyhľadania simulovaných odľahlých hodnôt je 98.7 %.
- Spoľahlivosť detegovania skokov v časovom rade narastá s ich veľkosťou. Pre skoky 10 nm.s^{-2} a väčšie dosahuje až 100 %, zatiaľ čo reálna presnosť určenia veľkosti skoku je na úrovni ±2 nm.s^{-2}.
- V prípade interpolácie gravimetrických meraní bolo preukázané, že až 90 % chýbajúcich meraní v dĺžke do dvoch hodín je nahradených s presnosťou lepšou ako 1.0 nm.s^{-2} v závislosti od dĺžky prerušenia. Celý proces je plne automatizovaný a spoľahlivosť interpolácie je výrazne lepšia ako v prípade metódy „remove-restore“ s uvážením teoretických slapových parametrov pre pevnú nedeformovateľnú Zem. Efektivita a spoľahlivosť interpolácie závisí aj od kvality gravimetrických meraní, čo dokazovali rozdiely medzi oboma testovanými stanicami.
- Prerušenia vyskytujúce sa v pozorovaniach atmosférického tlaku postačuje interpolovať s využitím lineárnej regresie a polynómov nižších stupňov. Testovanie v tomto prípade preukázalo, že chyby interpolácie atmosférického tlaku v medzerách s dĺžkou do 120 min odpovedajú zmenám tiažového zrýchlenia < 1 nm.s^{-2}, čo je na úrovni presnosti interpolácie gravimetrických meraní.

Testovanie uvedených metód preukázalo ich spoľahlivosť a aplikovateľnosť na gravimetrické merania a pozorovania atmosférického tlaku. Na základe uvedených záverov bola stanovená stratégia, z ktorej sme vychádzali pri ich ďalšom spracovaní.

3.3 Aplikovanie navrhnutých metód spracovania gravimetrických meraní na vybranú sieť SG

Do numerického experimentu bolo vybraných 9 SG projektu GGP, ktoré sa nachádzajú v západnej a strednej Európe (viď. obr. 3.6). V takomto prípade sú gravimetrické merania ovplyvnené dominantnou slapovou zložkou vrátane účinku oceánskych slapov v rozdielnej miere. To nám umožní analyzovať odhadnuté slapové parametre z rôznych hľadísk. Základné informácie o vybraných SG sú uvedené v tab. 3.1, kde ID je identifikačný kód stanice podľa GGP (*GGP, online*). Stanice sú vybavené nasledovnými typmi SG: „CT“ (Compact Tidal, jednoguľový), „CD“ (Double Sphere, dvojguľový), „OSG“ (Observatory Superconducting Gravimeter, jednoguľový) a OSGD (Observatory Superconducting Gravimeter-Double, dvojguľový). V prípade dvojguľových gravimetrov sú použité záznamy odpovedajúce spodnej supravodivej guli L (lower). Spracovávané boli 1 mesačné záznamy so vzorkovacou periódou 1 min poskytované prostredníctvom služby ISDC (*ISDC, online*). Celý proces predspracovania gravimetrických meraní a pozorovaní atmosférického tlaku pozostával z krokov uvedených v kapitole 3.1.

Tab. 3.1 Prehľad vybraných staníc SG

ID	**Miesto**	**Zemepisná šírka**	**Zemepisná dĺžka**	**Nadmorská výška**	**Typ SG**	**Prevádzkovateľ** (oficiálny názov)
BF	Schiltach (Black Forest) *Nemecko*	48.3298°N	8.3273°E	589.2 m	OSGD-056L	Universität Stuttgart
BH	Bad Homburg *Nemecko*	50.2285°N	8.6113°E	190.0 m	OSG-044	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), Frankfurt
MB	Membach *Belgicko*	50.6093°N	6.0066°E	250.0 m	CT-021	Observatoire Royal de Belgique
MC	Medicina *Taliansko*	44.5219°N	11.6450°E	28.0 m	CT-023	Università di Bologna, BKG Frankfurt
MO	Moxa *Nemecko*	50.6447°N	11.6156°E	455.0 m	CD-034L	Institut für Geowissenschaften, FSU Jena
PE	Pecný *Česká republika*	49.9138°N	14.7856°E	534.6 m	OSG-050	Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický, Zdiby
ST	Štrasburg *Francúzsko*	48.6217°N	7.6838°E	180.0 m	CT-026	Université de Strasbourg
VI	Viedeň *Rakúsko*	48.2489°N	16.3565°E	192.0 m	CT-025	Universität Wien, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik
WE	Wettzell *Nemecko*	49.1440°N	12.8780°E	613.7 m	CD-029L	BKG, Frankfurt

Pre väčšinu uvažovaných SG boli kalibračné parametre, t.j. kalibračný faktor a časové oneskorenie meracieho systému, prevzaté z databázy GGP, tak ako sú udávané v hlavičkách poskytovaných súborov. V prípade staníc Viedeň a Membach boli hodnoty parametrov získané priamo od ich operátorov (VI - B. Meurers, MB - M. Hendrickx), nakoľko v GGP neboli doteraz aktualizované. Použitie neaktuálnych alebo nesprávnych parametrov môže skresliť výsledky

ďalších analýz. Preto je ich kontrole potrebné venovať zvýšenú pozornosť, príp. overiť si ich priamo u operátorov SG. V tab. 3.2 sú zhrnuté základné informácie zo spracovania záznamov vo vybranej sieti SG pomocou navrhnutého postupu a metód.

Tab. 3.2 Výsledky z predspracovania gravimetrických meraní a pozorovaní atmosférického tlaku

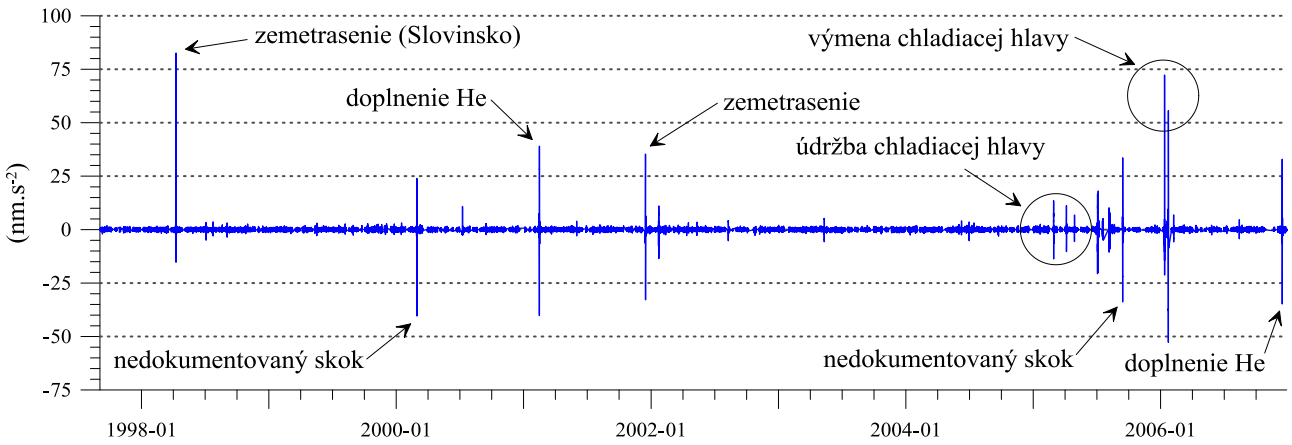
ID	BF	BH	MB	MC	MO	PE	ST	VI	WE
GRAVIMETRICKÉ MERANIA									
Počet mesačných súborov	33	63	138	70	156	60	182	114	43
Počet meraní v dňoch	998.91	1896.84	4171.35	2112.48	4620.75	1825.18	5380.34	3435.47	1281.81
Počet odľahlých meraní v dňoch	50.72 (5.1 %)	60.78 (3.2 %)	110.18 (2.6 %)	170.84 (8.1 %)	176.99 (3.8 %)	44.22 (2.4 %)	171.28 (3.2 %)	89.80 (2.6 %)	45.99 (3.6 %)
Počet skokov odstránené/ignorované	0/2	2/3	0/1	0/1	3/6	2/8	3/14	2/15	2/0
Počet meraní po opravách a filtrovaní v dňoch	914.99	1805.81	3696.74	1091.30	4330.67	1722.49	5129.30	3308.93	1201.78
Strata meraní	-8.4 %	-4.8 %	-11.4 %	-48.3 %	-6.3 %	-5.6 %	-4.7 %	-3.7 %	-6.2 %
ATMOSFÉRICKÝ TLAK									
Počet meraní v dňoch	1003.81	1896.97	4172.07	2112.57	4620.76	1826.28	5456.24	3441.11	1282.20
Počet meraní po opravách a filtrovaní v dňoch	1004.00	1897.02	4142.77	2112.61	4574.26	1826.87	5435.26	3442.40	1282.21
Strata meraní	0.02 %	0.00 %	-0.70 %	0.00 %	-1.01 %	0.03 %	-0.38 %	0.04 %	0.00 %
PREVZORKOVANÉ GRAVIMETRICKÉ MERANIA A ATMOSFÉRICKÝ TLAK									
Počet meraní v dňoch	914.96	1757.67	3598.67	1065.67	4295.54	1622.67	4838.71	3237.75	1201.63
Počet blokov	32	40	126	63	110	36	136	87	32

Priemerný počet identifikovaných a odstránených odľahlých hodnôt vrátane zemetrasení dosahuje približne 3.8 % v závislosti od SG. Odstránené skoky predstavujú počet skokov, ktoré boli navrhnutou metódou detegované a eliminované. Kontrola rezíduí po slapovej analýze, ktorú bližšie spomenieme v kapitole 3.4.1, odhalila prítomnosť ďalších skokov. V mieste skoku bola preto ponechaná medzera, pretože by došlo k chybnej interpolácii chýbajúcich hodnôt. Takýto skok je v tab. 3.2 označený ako ignorovaný. Strata meraní potom vyjadruje zníženie ich počtu oproti pôvodným meraniam po zavedení všetkých opráv a low-pass filtrovaní. Znamienko mínus znamená, že sa jedná o úbytok. Ten je spôsobený najmä filtrovaním, ktoré si vyžaduje minimálnu dĺžku neprerušených meraní takmer 9 dní. Kratšie bloky sú preto zo spracovania vylúčené. Priemerná strata meraní sa pohybuje na úrovni -6.4 % s výnimkou stanice Medicina (veľký počet prerušení nad 120 min). V prípade pozorovaní atmosférického tlaku dochádza len k minimálnej strate údajov. Na záver sú gravimetrické merania spolu s atmosférickým tlakom prevzorkované na periódu 1 h a usporiadané do celistvých blokov bez prerušení, ktoré budú slúžiť ako vstup do slapovej analýzy. V tomto prípade sa jedná už o kontinuálne záznamy v rámci jednotlivých blokov.

3.4 Slapová analýza - odhad slapových parametrov

3.4.1 Pozorované slapové parametre

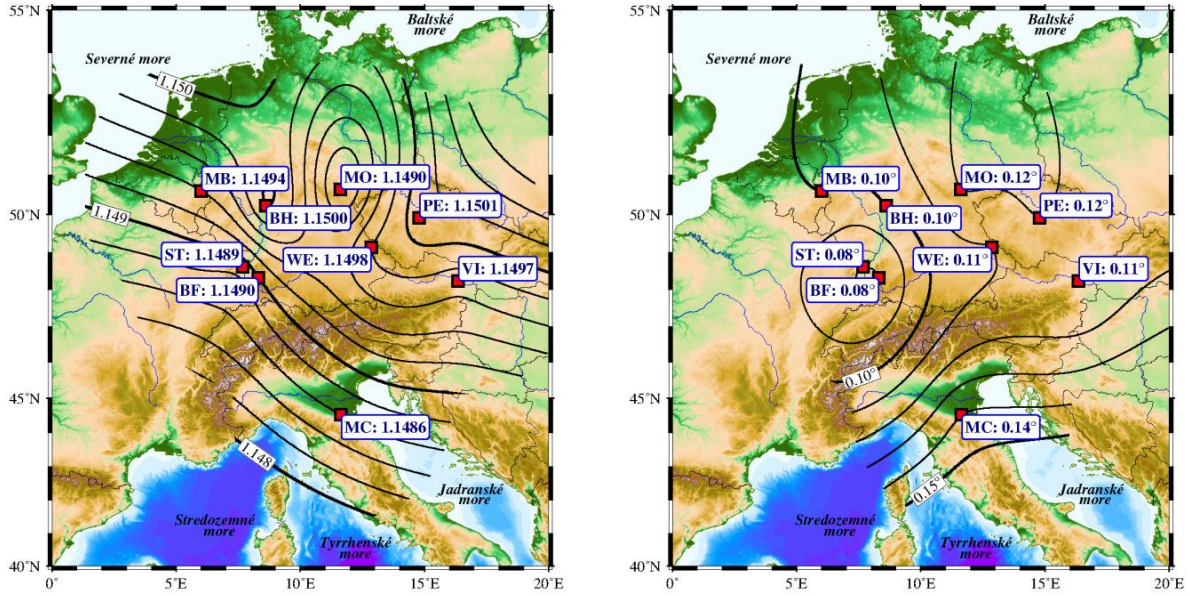
Odhad slapových parametrov je vykonaný v programe ANALYZE, ktorý je súčasťou programového balíka ETERNA 3.40 (*Wenzel, 1996*). Amplitúdové faktory δ a fázové posuny α budeme určovať pre denné a poldenné slapové spektrum, ktorého účinok je v absolútnych alebo relatívnych gravimetrických meraniach najviditeľnejší. V tomto prípade je z 1 h meraní odstránená dlhovlnná zložka signálu odpovedajúca dlhoperiodickým slapom alebo chodu gravimetra pomocou high-pass filtrovania. Výstup z programu ANALYZE potom tvorí protokol obsahujúci odhady slapových parametrov spolu s charakteristikami presnosti pre použité slapové skupiny, odhad regresného parametra vyjadrujúceho vplyv variácie atmosférického tlaku na tiažové zrýchlenie a ďalšie štatistické informácie opisujúce kvalitu analýzy. Súčasťou výstupov ANALYZE sú aj rezíduá odpovedajúce gravimetrickým meraniam, z ktorých bol odstránený účinok slapov vypočítaný z už odhadnutých slapových parametrov a vplyv variácie atmosférického tlaku na tiažové zrýchlenie. Dodatočná kontrola týchto rezíduí nám umožní v meranom signále odhaliť prítomnosť ďalších nežiaducich porúch, ktoré môžu byť z meraní následne eliminované. Dosiahneme tým zvýšenie vnútornej presnosti slapovej analýzy. Situácia je ilustrovaná na obr. 3.5 pre SG na stanici Viedeň. Rezíduá po prvotnej slapovej analýze obsahujú významne vybočujúce hodnoty, ktoré v prevažnej miere korešpondujú s nedetegovanými skokmi. Ich pôvod bolo vo väčšine prípadov možné overiť v protokolových súboroch pre príslušnú stanicu (obr. 3.5). Zavedením prerušení v miestach skokov, ktoré nebudú následne interpolované, je možné ich výskyt v meraniach významne eliminovať.



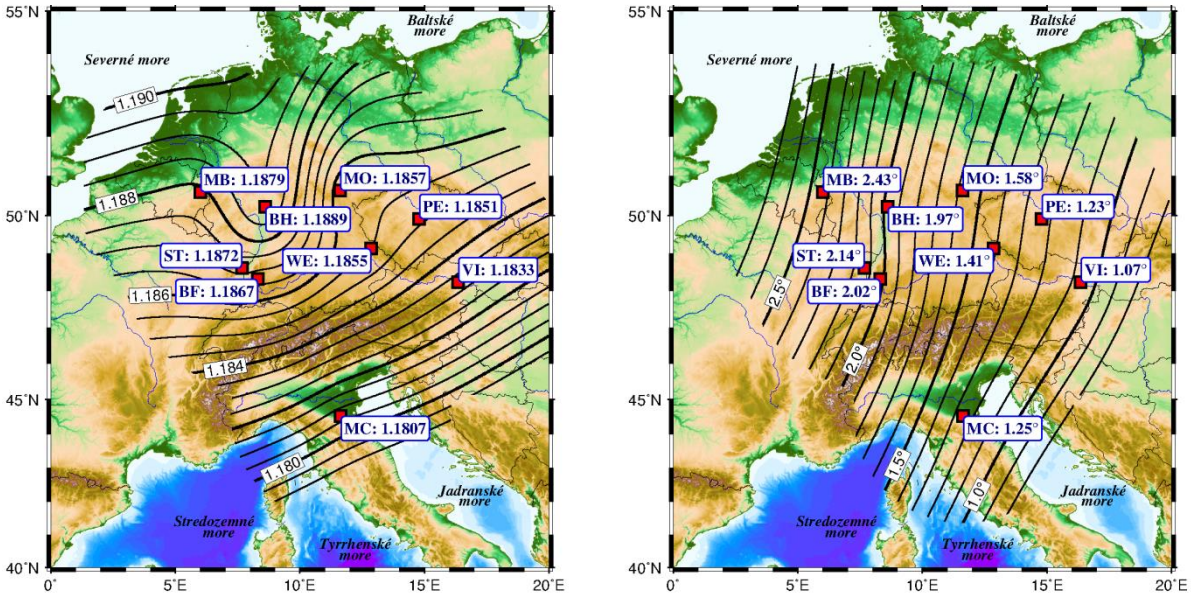
Obr. 3.5 Rezíduá gravimetrických meraní po slapovej analýze na stanici SG Viedeň

Pri ďalších analýzach sa zameriame na iba na dve slapové skupiny, ktoré obsahujú hlavné vlny O_1 a M_2 dostatočne reprezentujúce denné a poldenné slapové spektrum. Obe vlny nadobúdajú pre zemepisnú šírku 45° približne rovnaké amplitúdy (~ 300 nm.s^{-2}). Na odlíšenie budeme odhadnuté slapové parametre ďalej nazývať ako pozorované, nakoľko sú získané z gravimetrických meraní. Hodnoty pozorovaných slapových parametrov pre O_1 a M_2 sú vykreslené na obr. 3.6 a 3.7 v závislosti od polohy staníc SG. V oboch prípadoch pomocné izočiary pozorovaných amplitúdových faktorov a fázových posunov odhaľujú vplyv oceánskych slapov, ale tiež miernu závislosť amplitúdových faktorov od zemepisnej šírky jednotlivých staníc. Výrazná anomália

izočiar amplitúdových faktorov v okolí staníc Moxa a Membach naznačuje problém v určení kalibračného faktora. Detailnú analýzu bude možné vykonať až po odstránení účinku oceánskych slapov z pozorovaných slapových parametrov.



Obr. 3.6 Pozorované amplitúdové faktory (vľavo) a fázové posuny (vpravo) pre O_1

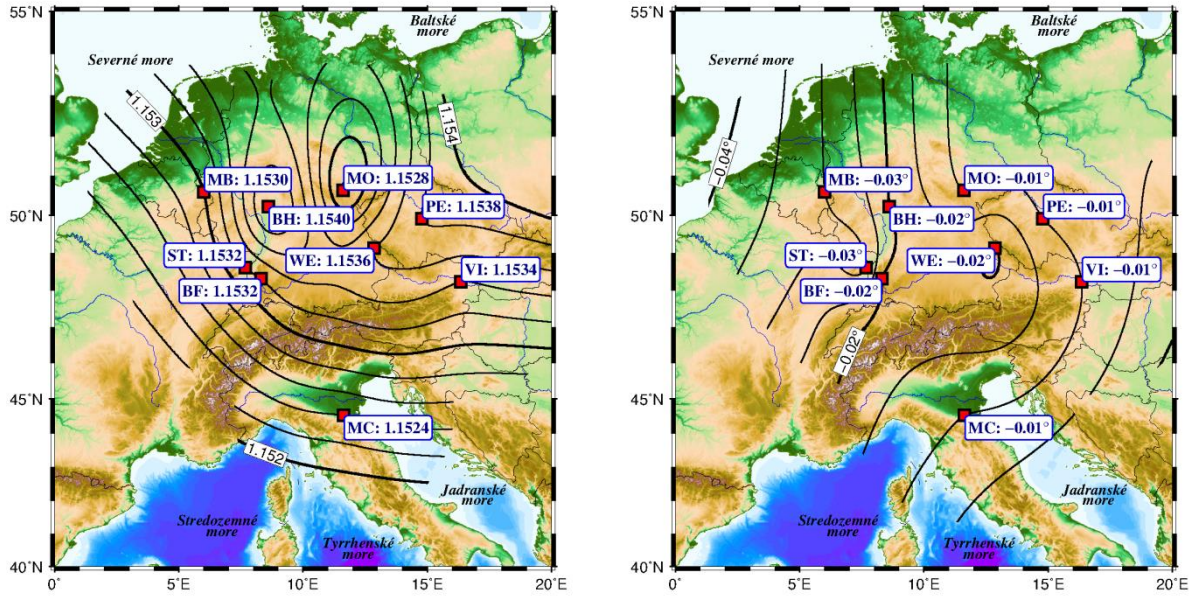


Obr. 3.7 Pozorované amplitúdové faktory (vľavo) a fázové posuny (vpravo) pre M_2

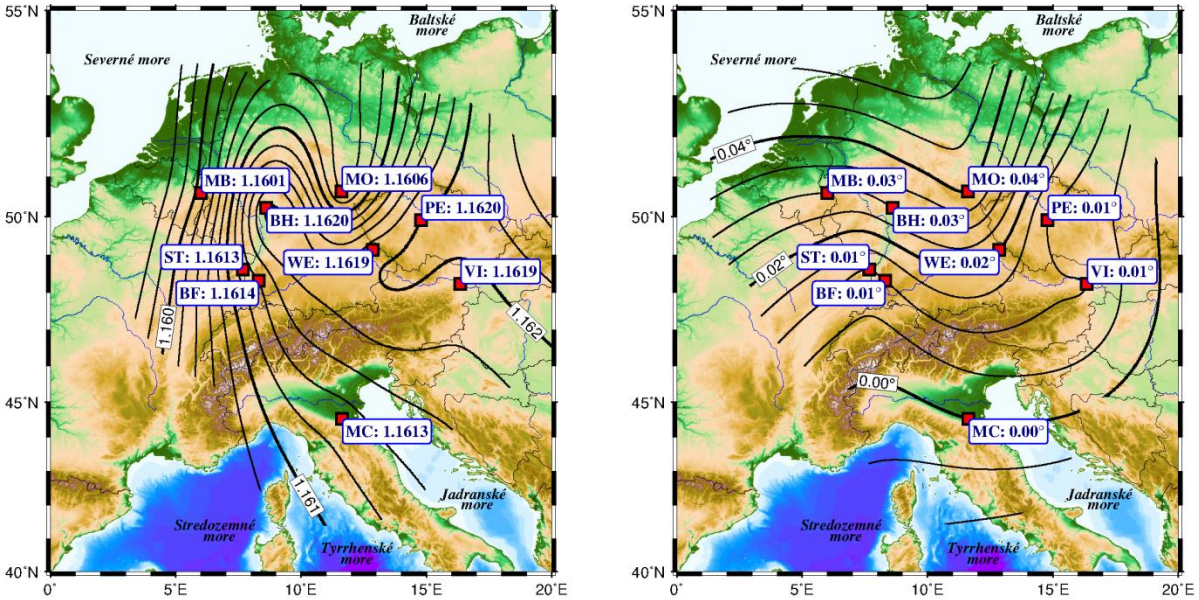
3.4.2 Opravené slapové parametre

Na eliminovanie vplyvu oceánskych slapov v pozorovaných amplitúdových faktoroch α a fázových posunoch δ sme použili 5 dostupných modelov s rôznym priestorovým rozlíšením: 0.25×0.25° - TPXO7.2 (2002); 0.125×0.125° - FES2004 (2004), HAMTIDE (2010), EOT11a

(2011) a GOT4.8 (2011). Použitá bola webová služba OTLP (Ocean Tide Loading Provider) (*OTLP, online*). Každý z modelov pozostáva z amplitúd L a fáz λ vektora oceánskych slapov **L** pre 11 hlavných slapových vĺn vrátane O_1 a M_2. Slapové parametre po zavedení korekcie z oceánskych slapov budeme nazývať opravené. Ich výpočet bol vykonaný podľa vzťahu (2.2) uvedeného v kapitole 2.4. Detailný postup výpočtu korekcie možno nájsť (*Neumeyer, 2010*) alebo (*Sun a kol., 1999*).



Obr. 3.8 Priemerné opravené amplitúdové faktory (vľavo) a fázové posuny (vpravo) pre O_1



Obr. 3.9 Priemerné opravené amplitúdové faktory (vľavo) a fázové posuny (vpravo) pre M_2

Na obr. 3.8 a 3.9 sú vykreslené opravené slapové parametre pre vlny O_1 a M_2 v závislosti od polohy staníc SG pomocou izočiar, ktoré odpovedajú ich priemerným hodnotám zo všetkých uvažovaných modelov oceánskych slapov. Anomálny priebeh izočiar opravených amplitúdových faktorov je

očividný pre vnútrozemskú stanicu Moxa (MO) a pobrežnú stanicu Membach (MB). V oboch prípadoch možno predpokladať nedostatok v určení kalibračného faktora SG. Pre MB je to navyše aj nepresnosť v zavedení korekcie oceánskych slapov. Amplitúdové faktory ostatných staníc vykazujú pomerne dobrú konzistenciu s viditeľnou závislosťou na zemepisnej šírke. Opravené fázové posuny by mali nadobúdať hodnoty blízke nule. Avšak na obr. 3.8 a 3.9 možno vidieť ich systematickú zmenu v smere juhovýchod a severozápad, ktorá je pravdepodobne spôsobená nedostatkami v modelovaní zložiek vektora oceánskych slapov.

Na základe porovnania opravených slapových parametrov vo vybranej sieti SG bolo možné stanoviť aj ďalšie závery. V prvom prípade sme skúmali presnosť zavedenej korekcie oceánskych slapov v pozorovaných slapových parametroch. Pre každý jeden model boli vyčíslené priemerné hodnoty opravených slapových parametrov zo všetkých staníc SG. V takomto prípade kalibračné chyby SG zaťažia hodnoty týchto priemerov rovnakým spôsobom a na výslednom odhade presnosti korekcie sa neprejavia. Potom ich štandardná odchýlka odpovedá priamo relatívnej presnosti korekcie oceánskych slapov v študovanej oblasti, ktorá je 0.14 ‰ (O_1), 0.61 ‰ (M_2) pre amplitúdové faktory a 0.01° (O_1), 0.03° (M_2) pre fázové posuny. Druhé porovnanie skúmalo vplyv kalibračných chýb SG na odhad slapových parametrov na základe priemerných hodnôt slapových parametrov, ktoré boli v tomto prípade vypočítané na každej stanici SG zo všetkých uvažovaných modelov oceánskych slapov. Teoreticky by odchýlky medzi týmito priemermi mali byť spôsobené iba rozdielnou polohou jednotlivých staníc. V skutočnosti sú v nich zahrnuté aj nedostatky v určení kalibračných faktorov. V tomto prípade sa totiž chyby zavedenia korekcie oceánskych slapov prejavia na príslušných staniciach rovnakým spôsobom. Potom je možné odvodiť globálnu kalibračnú chybu prítomnú v odhadoch slapových parametrov vo vybranej sieti SG. Táto chyba dosahuje je 0.43 ‰ (O_1), 0.56 ‰ (M_2) pre amplitúdové faktory a 0.01° (O_1), 0.01° (M_2) pre fázové posuny. Rozdiely amplitúdových faktorov z dôvodu rozdielnej polohy staníc neprekračujú 0.10 ‰ (0.0001). Z porovnania oboch štandardných odchýlok vyplýva, že pre O_1 spôsobuje kalibračná chyba väčšiu neistotu ako rozdiely medzi použitými modelmi oceánskych slapov. Pre M_2 sú nedostatky v kalibrácii približne na úrovni presnosti zavedenej korekcie. Na druhej strane, časové oneskorenia SG sú určené s vyššou presnosťou ako fázové zložky vektora oceánskych slapov. Zavedenie korekcie oceánskych slapov tak môže do gravimetrických meraní a výsledkov analýz vniesť určitú neistotu. Tá je dôsledkom nedokonalostí teoretických modelov. Preto je aj naďalej užitočné venovať sa ich ďalšiemu spresňovaniu. Hodnota globálne kalibračnej chyby taktiež preukázala zvýšenie presnosti určenia kalibračného faktora na úroveň 0.60 ‰ (viď kapitola 2.1).

3.4.3 Porovnanie opravených slapových parametrov s teoretickými modelmi

Opravené amplitúdové faktory δ_c vykreslené na obr. 3.8 a 3.9 sme porovnali s ich teoretickými hodnotami δ_{th} získanými z dostupných modelov, ktoré opisujú odozvu Zeme na pôsobenie slapov. Použili sme dva súčasné modely pre rotujúcu a nesférickú Zem (*Dehant a kol., 1999*), a to hydrostatický/elastický model DDW/He a nehydrostatický/anelastický model DDW/NHa. Teoretické fázové posuny nadobúdajú v oboch prípadoch zanedbateľne malé hodnoty, preto ich nebudeme ďalej uvažovať. Teoretické amplitúdové faktory $\delta_{\mathrm{DDW/He}}$ a $\delta_{\mathrm{DDW/NHa}}$ sú vypísané v tab. 3.3. Porovnanie sme vykonali prostredníctvom rozdielov $\Delta\delta_{\mathrm{DDW/He}}$ a $\Delta\delta_{\mathrm{DDW/NHa}}$ medzi opravenými a teoretickými amplitúdovými faktormi príslušného modelu a na každej stanici. Vo väčšine prípadov odpovedajúcich O_1 sú menšie rozdiely získané pre elastický model DDW/He.

Anelastický model DDW/NHa zase lepšie opisuje opravené amplitúdové faktory pre M_2. Uvedené pravidlo však neplatí všeobecne. Ako možno vidieť v tab. 3.3, na staniciach Bad Homburg (BH), Pecný (PE) alebo Wettzell (WE) sú opravené amplitúdové faktory v lepšej zhode s anelastickým modelom DDW/NHa pre O_1 aj M_2. Na stanici v Moxe (MO) je to zase elastický model DDW/He. Z priemerných rozdielov však vyplýva, že výber vhodného modelu môže vylepšiť výpočet teoretického slapového signálu.

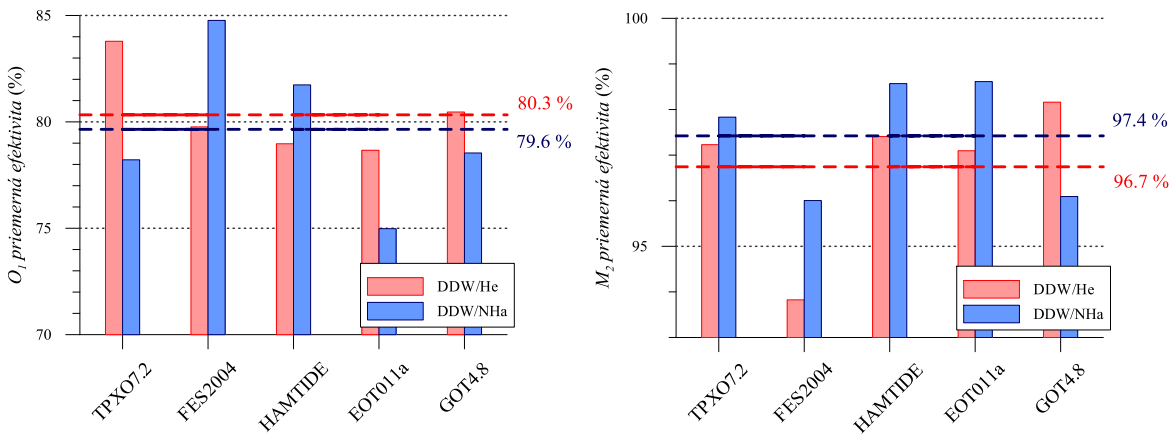
Tab. 3.3 Porovnanie opravených a teoretických amplitúdových faktorov pre O_1 a M_2

ID	O_1					M_2				
	δ_c	$\delta_{DDW/He}$	$\delta_{DDW/NHa}$	$\Delta\delta_{DDW/He}$	$\Delta\delta_{DDW/NHa}$	δ_c	$\delta_{DDW/He}$	$\delta_{DDW/NHa}$	$\Delta\delta_{DDW/He}$	$\Delta\delta_{DDW/NHa}$
BF	1.1532	1.15282	1.15429	0.34 ‰	-0.94 ‰	1.1614	1.16048	1.16197	0.80 ‰	-0.49 ‰
BH	1.1540	1.15283	1.15431	1.01 ‰	-0.27 ‰	1.1620	1.16049	1.16199	1.31 ‰	0.02 ‰
MB	1.1530	1.15283	1.15431	0.17 ‰	-1.11 ‰	1.1601	1.16049	1.16200	-0.31 ‰	-1.60 ‰
MC	1.1524	1.15281	1.15427	-0.35‰	-1.62 ‰	1.1613	1.16045	1.16193	0.75 ‰	-0.52 ‰
MO	1.1528	1.15283	1.15431	-0.01 ‰	-1.30 ‰	1.1606	1.16049	1.16200	0.10 ‰	-1.19 ‰
PE	1.1538	1.15283	1.15431	0.85 ‰	-0.43 ‰	1.1620	1.16049	1.16199	1.27 ‰	-0.02 ‰
ST	1.1532	1.15282	1.15430	0.34 ‰	-0.93 ‰	1.1613	1.16048	1.16198	0.67 ‰	-0.62 ‰
VI	1.1534	1.15282	1.15429	0.51 ‰	-0.77 ‰	1.1619	1.16048	1.16197	1.20 ‰	-0.09 ‰
WE	1.1536	1.15283	1.15430	0.67 ‰	-0.61 ‰	1.1619	1.16048	1.16198	1.18 ‰	-0.11 ‰
MEAN	**1.1533**	**1.15282**	1.15430	**0.39 ‰**	-0.89 ‰	**1.1614**	**1.16048**	1.16198	0.78 ‰	**-0.51 ‰**

MEAN - aritmetický priemer

3.4.4 Analýza reziduálnych vektorov

Stanovenie efektivity použitých modelov oceánskych slapov nám umožní analýza reziduálnych vektorov **B** a **X** definovaných vzťahmi (2.3) a (2.4). Ich význam je bližšie vysvetlený v kapitole 2.4. Veľkosť reziduálneho vektora **B** závisí od voľby teoretického modelu Zeme. Preto budeme uvažovať obidva teoretické modely DDW/He a DDW/NHa, o ktorých sme sa zmienili v predchádzajúcej časti. Priemerná efektivita nám potom hovorí, do akej miery sú pozorované reziduálne vektory **B** na staniciach SG redukované zavedením korekcie oceánskych slapov s uvážením príslušného modelu. Výsledky sú graficky interpretované na obr. 3.10.



Obr. 3.10 Priemerná efektivita modelov oceánskych slapov pre O_1 (vľavo) a M_2 (vpravo)

Ako je možné vidieť, tak rozdiely medzi modelmi dosahujú rádovo niekoľko percent v závislosti od použitého teoretické modelu Zeme. Je zrejmé, že vyššia efektivita pre O_1 je dosiahnutá s použitím elastického modelu DDW/He, zatiaľ čo pre M_2 je to anelastický model DDW/NHa. Priemerná hodnota efektivity zo všetkých modelov oceánskych slapov je približne 80 % pre O_1 a 97 % pre M_2. Obdobným spôsobom boli vyčíslené aj priemerné amplitúdy reziduálnych vektorov $\overline{X}$ na jednotlivých staniciach SG. Tie odrážajú nedokonalosti použitých modelov oceánskych slapov. Avšak môžu reflektovať aj prítomnosť ďalších nedostatkov a chýb, ktoré sú v prevažnej miere spôsobené kalibráciou jednotlivých SG. Vo všeobecnosti však možno konštatovať, že rozdiel medzi teoretickým slapovým signálom vypočítaným na základe testovaných modelov a slapovým signálom vyčísleným z pozorovaných slapových parametrov vo väčšine prípadov nepresahuje 0.5 $nm.s^{-2}$.

4 Prínosy dizertačnej práce pre vedu a prax

Za hlavné prínosy dizertačnej práce pre vedu a prax možno považovať:

- Návrh postupu homogenizovaného predspracovania gravimetrických meraní spolu s atmosférickým tlakom na slapovú analýzu so zameraním sa na denné a poldenné slapové spektrum. Jednotlivé kroky sú v práci detailne opísané vrátane vyslovených odporúčaní, ktoré zabezpečia spoľahlivý odhad slapových parametrov a sú aplikovateľné v praxi.
- Postup predspracovania meraní zahŕňa návrh metód, ktoré umožňujú detegovanie a odstraňovanie odľahlých meraní vrátane zemetrasení a jednoduchých skokov.
- Za novátorský možno považovať nový interpolačný algoritmus na vypĺňanie prerušení v gravimetrických meraniach využívajúci kolokáciu metódou najmenších štvorcov a určovanie parametrov kovariančnej funkcie pomocou Bayesovho teorému a modifikovanej optimalizácie.
- Prednosťou navrhnutých metód je, že predstavujú novú alternatívu k doteraz zaužívanému postupu predspracovania gravimetrických meraní založeného na prístupe „remove-restore“. To znamená, že nie je potrebné vopred poznať presný slapový model a priebeh atmosférického tlaku v mieste merania.
- Uvedené spracovateľské metódy je možné s miernymi modifikáciami aplikovať aj na časové rady v iných vedných disciplínach (napr. klimatológia, meteorológia) a majú tak okrem gravimetrie širšie uplatnenie.
- Porovnanie výsledkov slapových analýz vo vybranej sieti SG v Európe umožnilo vykonať testovanie súčasných modelov oceánskych slapov, teoretických slapových modelov Zeme a odhaliť nedostatky v kalibrácii SG. Stanovená bola relatívna presnosť výpočtu korekcie oceánskych slapov a globálna presnosť kalibračných parametrov. Dosiahnuté výsledky majú navyše význam aj z praktického hľadiska, nakoľko umožňujú pre daný SG alebo lokalitu výber vhodnej kombinácie teoretických modelov, ktoré budú najlepšie opisovať skutočný slapový signál.
- Súčasťou dizertačnej práce sú aj presné odhady pozorovaných slapových parametrov vo vybranej sieti SG, ktoré môžu byť aplikované na výpočet slapovej korekcie v prípade relatívnych alebo absolútnych gravimetrických meraní v praxi. Vo výsledkoch sú obsiahnuté aj atmosférické regresné parametre, ktoré umožňujú jednoduché odstránenie vplyvu variácie atmosférického tlaku na tiažové zrýchlenie.

5 Záver

Vzhľadom k stanoveným cieľom dizertačnej práce sme navrhli postup homogenizovaného predspracovania dlhodobých gravimetrických meraní SG aplikovateľný na slapové analýzy. Vychádzali sme zo súčasného stavu danej problematiky a postupov spracovania záznamov SG, pričom sme sa snažili poukázať na ich nevýhody a obmedzenia. Jedná sa najmä o potrebu modelovania niektorých principiálnych zložiek signálu tak, aby mohli byť vyhľadané a odstránené nežiaduce poruchy. Nové prístupy uvedené v tejto práci tento problém prekonávajú. Avšak je potrebné uviesť, že ich použitie môže byť v niektorých situáciách nedostačujúce, najmä čo sa týka analýzy dlhovlnných zložiek gravimetrických meraní. V prípade odhadu slapových parametrov pre najvýraznejšie denné a poldenné slapové spektrum sú opísané postupy a metódy plne postačujúce a funkčné, čo preukázalo aj ich testovanie na syntetických aj reálnych gravimetrických meraniach. Súčasne sú spracovávané aj pozorovania atmosférického tlaku.

Aplikovanie navrhnutých postupov a metód na gravimetrické merania realizované vybranou skupinou SG potvrdilo ich praktické použitie. Spoločná stratégia predspracovania gravimetrických meraní je totiž nevyhnutnou požiadavkou na získanie objektívnych výsledkov ich následných analýz. V nadväznosti na čiastkové ciele dizertačnej práce sme sa zamerali na testovanie vybranej vzorky súčasných modelov oceánskych slapov, stanovenie ich efektivity a relatívnej presnosti počítanej korekcie. Slapové parametre opravené o vplyv oceánskych slapov sme porovnávali s ich teoretickými hodnotami získanými z dostupných modelov Zeme. Ako bolo dokázané, súčasne s týmito analýzami je možné odhaliť nedostatky v kalibrácii jednotlivých SG a taktiež odvodiť globálnu kalibračnú chybu.

Výsledky jednotlivých analýz majú aj aplikačný charakter, nakoľko sme porovnávali teoretický slapový signál vypočítaný z modelov a skutočný slapový signál určený na základe pozorovaných slapových parametrov. To dovoľuje výber vhodnej kombinácie teoretických modelov pre daný SG a lokalitu, ktorá najlepšie vystihuje skutočný slapový efekt. Umožní to tak spresnenie výpočtu slapovej korekcie realizovanej na základe modelov v prípade relatívnych aj absolútnych gravimetrických meraní.

Uvedené závery a odporúčania sú platné v regionálnom meradle, ktoré je dané rozmiestnením jednotlivých SG v strednej a západnej Európe. Rozšírenie študovanej siete SG v globálnom rozsahu a navýšenie počtu modelov oceánskych slapov tak môže priniesť ďalšie užitočné informácie vo vzťahu k výsledkom slapových analýz.

Summary

ANALYSIS OF LONGTIME SUPERCONDUCTING GRAVITY MEASUREMENTS

Considering the dissertation thesis objectives, a homogenized preprocessing of longtime superconducting gravity observations for purpose of tidal analysis was designed. We have reviewed the present processing techniques based on modeling of principal constituents of the gravity signal with aim to detect and remove undesired artifacts in measured data. New approaches introduced inthesis overcome this problem and they are fully applicable for the tidal parameters estimation related to diurnal and semidiurnal tidal spectrum. Their functionality was empirically proved. Atmospheric pressure records are also processed.

Applying the proposed procedure and methods on gravity observations at a specific network of superconducting gravimeters has confirmed their practical user benefit. A homogeneous strategy of data preprocessing is necessary to obtain unbiased results of further analyses. Consequently, a homogenized data was used on tidal parameters estimation. We have focused on the testing of present ocean loading models with aim to determine an accuracy of ocean loading correction and evaluate their effectiveness. Corrected tidal parameters were compared with their theoretical values obtained from Earth's models of tidal response. As it was demonstrated, such analyses are also able to reveal an inadequacies in gravimeters calibration and to derive a global calibration error.

Conclusions of the thesis are in general applicable for modeling of tidal correction for relative and absolute gravity measurements and allow to choose an appropriate theoretical tidal model for given superconducting gravimeter and location.

Literatúra

CHOJNICKY, T. Ein Verfahren zur Erdgezeitenanalyse in Anlehnung an das Prinzip der kleinsten Quadrate: Mitteilungen aus dem Institut fuer Theoretische Geodaesie der Universitaet Bonn. 1973, **15**.

CROSSLEY, D. - HINDERER, J. - CASULA, G. - FRANCIS, O. - HSU, H.T. - IMANISHI, Y. - JENTZSCH, G. - KÄÄRIÄNEN, J. - MERRIAM, J. - MEURERS, B. - NEUMEYER, J. - RICHTER, B. - SHIBUYA, K. - SATO, T. - VAN DAM, T. Network of superconducting gravimeters benefits a number of disciplines. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*. 1999, **80**(11), 121–126. doi 10.1029/99EO00079.

DEHANT, V. - DEFRAIGNE, P. - WAHR, J. Tides for a convective Earth. *Journal of Geophysical Research B*. 1999, **104**, 1035-1058.

DÖLL, P. - KASPAR, F. - LEHNER, B. A global hydrological model for deriving water availability indicators: model tuning and validation. *Journal of Hydrology*. 2003, **270**(1-2), 105-134.

DUCARME, B. - ROSAT, S. - VANDERCOILDEN, L. - XU, J.Q. - SUN, H.P. European tidal gravity observations: comparison with Earth Tides models and estimation of the Free Core Nutation (FCN) parameters. *Observing our Changing Earth, International Association of Geodesy Symposia*. 2009, **133**(3), 523-532. ISBN 978-3-540-85426-5.

FARRELL, W.E. Deformation of the Earth by surface loads. *Reviews of Geophysics*. 1972, **10**(3), 761–797.

FRANCIS, O. Calibration of the C021 superconducting gravimeter in Membach (Belgium) using 47 days of absolute gravity measurements. In: *International association of Geodesy Symp., Gravity, Geoid and Marine Geodesy*. 1997, **117**, p. 212-219.

HARRISON, P.J. - STEVENS, C.F. Bayesian forecasting (with discussion). *Journal of the Royal Statistical Society B*. 1976, **38**, 205–247.

HINDERER, J - CROSSLEY, D. Scientific achievements from the first phase (1997–2003) of the Global Geodynamics Project using a worldwide network of superconducting gravimeters. *Journal of Geodynamics*. 2004, **38**(3-5), 237-262.

HINDERER, J. - CROSSLEY, D. - WARBURTON, J.R. Gravimetric Methods - Superconducting Gravity Meters. In: SCHUBERT, G. *Treatise on Geophysics*. Elsevier Science, 2007, p. 65-122.

JANÁK, J. *Gravimetria*. Bratislava: STU Bratislava, 2010. ISBN 978-80-227-3254-3.

LUND, R - REEVES, J. Detection of Undocumented Changepoints: A Revision of the Two-Phase Regression Model. *Journal of Climate*. 2002, **15**, 2547–2554.

MATHEWS, P.M. Love numbers and gravimetric factors for diurnal tides. *Journal of the Geodetic Society of Japan*. 2001, **47**(1), 231–236. ISSN 0038-0830.

MILLY, P.C. D. - SHMAKIN, A.B. Global Modeling of Land Water and Energy Balances. Part I: The Land Dynamics (LaD) Model. *Journal of Hydrometeorology*. 2002, **3**, 283–299.

MORITZ, H. - SÜNKEL, H. *Approximation Methods in Geodesy*. Germany: John Wichmann, 1978. ISBN 3879070512.

NEUMEYER, J. - HAGEDOORN, J. - LEITLOFF, J. - SCHMIDT, R. Gravity reduction with threedimensional atmospheric pressure data for precise ground gravity measurements. *Journal of Geodynamics*. 2004, **38**, 437-450.

NEUMEYER, J. - PINO, J. - DIERKS, O. - SUN, H.P. - PFLUG, H. Improvement of ocean loading correction on gravity data with additional tide gauge measurements. *Journal of Geodynamics*. 2005, **40**, 104-111.

NEUMEYER, J. Superconducting Gravimetry. In: XU, G. *Sciences of Geodesy – I, Advances and Future Directions*. Berlin: Springer-Verlag, 2010, p. 339-413. ISBN 978-3-642-11740-4.

OPPENHEIM, A.V. - SCHAFER, R.W. *Discrete-Time Signal Processing*. Prentice-Hall, 1989, p. 284–285.

PÁLINKÁŠ, V. - KOSTELECKÝ, J. - ŠIMEK, J. A Feasibility of Absolute Gravity Measurements in Geodynamics. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*. 2010, **7**(1), 61-69. ISSN 1214-9705.

RASMUSSEN, C.E. - WILLIAMS, CH.K.I. *Gaussian Processes for Machine Learning*. Cambridge: The MIT Press, 2006. ISBN 9780262182539.

RODELL, M. - HOUSER, P.R. - JAMBOR, U. - GOTTSCHALCK, J. - MITCHELL, K. - MENG, C.J. - ARSENAULT, K. - COSGROVE, B. - RADAKOVICH, 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*. 2004, **85**(3), 381-394.

ROUSSEEUW, P.J.- LEROY, A.M. *Robust Regression and Outlier Detection*. New York: John Wiley & Sons, 1987.

SOLOW, A.R. Testing for climate change: An application of the two-phase regression model. *J. Climate Appl. Meteor.* 1987, **26**, 1401–1405.

SUN, H.P. - HSU, H. - LUO, S. - XU, J. Study of the ocean tidal models using tidal gravity observations obtained with superconducting gravimeter. *Acta Geodetica et Cartograaphy Sinica*. 1999, **28**(2), 64–71.

TAMURA, Y. - SATO, T. - OOE, M. - ISHIGURO, M. A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion. *Geophysical Journal International*. 1991, **104**, 507–516.

VAN CAMP, M. - VAUTERIN, P. - WENZEL, H.G. - SCHOTT, P. - FRANCIS, O. Accurate transfer function determination for superconducting gravimeters. *Geophysical Research Letters*. 2000, **27**, 37-40.

VAN CAMP, M. - VAUTERIN, P. Tsoft: graphical and interactive software for the analysis of time series and Earth tides. *Computers & Geosciences*. 2005, **31**(5), 631-640. ISSN 00983004.

VENEDIKOV, A.P. Une méthode d'analyse des marées terrestres àpartir d'enregistrements de longueurs arbitraires. *Série Géophysique*. 1966, **71**, 463-485.

VENEDIKOV, A.P. - ARNOSO, J. - VIEIRA, R. New version of program VAV for tidal data processing. *Computers and Geosciences*. 2005, **31**, 667-669.

WENZEL, H.G. The nanogal software: Earth tide data processing package ETERNA 3.0. *Bulletin D'Informations Mar´ees Terrestres*. 1996, **124**(2), 9425-9439. ISSN 1340-4202.

GGP. The Global Geodynamics Project, online.
URL http://www.eas.slu.edu/GGP/ggphome.html.

GGP-G1M1H. GGP FILTER, online.
URL http://www.eas.slu.edu/GGP/processing/general/g1m1h.dat.

ISDC. Information System and Data Center for geoscientific data, online.
URL http://isdc.gfz-potsdam.de/index.php.

OTLP. Ocean Tide Loading Provider, online.
URL http://holt.oso.chalmers.se/loading/.

Zoznam publikovaných prác z danej problematiky

HÁBEL, B. Nový prístup k interpolácii tiažových meraní vykonaných supravodivým gravimetrom. In: *Juniorstav 2013: 15. odborná konference doktorského studia s mezinárodní účastí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2013, s. 1-9. ISBN 978-80-214-4670-0.

HÁBEL, B. - JANÁK, J. A new effective algorithm for interpolation of superconducting gravity measurement. In: *Gravitifield Symposium* [elektronický zdroj]. Benátky, Taliansko, 9.-12.10.2012. 2012.

HÁBEL, B. - MEURERS, B. Slapová analýza tiažových meraní poskytovaných globálnym geodynamickým projektom. In: *Využitie moderných geodetických technológií v súčasných geodetických referenčných systémoch*. Bratislava: Slovenská spoločnosť geodetov a kartografov, 2012, s. 115-122. ISBN 978-80-89626-00-7.

HÁBEL, B. Porovnanie slapových parametrov vybranej siete supravodivých gravimetrov v Európe. In: *Juniorstav 2012: 14. odborná konference doktorského studia s mezinárodní účastí.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2012, s. 1-9. ISBN 978-80-214-4393-8.

HÁBEL, B. Aplikovanie metód spektrálnej analýzy na slapový signál meraný supravodivým gravimetrom. In: *Juniorstav 2011: 13. odborná konference doktorského studia s mezinárodní účastí.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2011, s. 1-11. ISBN 978-80-214-4232-0.

HÁBEL, B. Analýza a interpretácia mikrogravimetrických meraní v oblasti Čachtickej jaskyne. In: *Juniorstav 2010: 12. odborná konference doktorského studia s mezinárodní účastí.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2010, s. 1-9. ISBN 978-80-214-4042-5.