

12.2.2021

POSUDEK OPONENTA DOKTORSKÉ DIZERTAČNÍ PRÁCE

Autor: Ing. Michal Buday

Název práce: Geophysical methods of integration of the local vertical datums into World Height System

Oponent: prof. Ing. Pavel Novák, PhD.

Pracoviště: Fakulta aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni

1. Aktuálnost tématu doktorské disertační práce:

Téma doktorské disertační práce Ing. Budaye je velmi aktuální. Mezinárodní geodetická komunita v současné době pod hlavičkou Mezinárodní geodetické asociace (IAG) řeší projekt globálního výškového systému, který zahrnuje určení vztahu k lokálním výškovým systémům používaným v různých částech světa. Předložená disertační práce diskutuje dva návrhy řešení pro integraci lokálních výškových systémů do světového výškového systému, které jsou v práci testovány na lokálních výškových systémech v České republice a Slovenské republice.

2. Formální úprava disertační práce, jazyková úroveň

Text doktorské dizertace má 125 stran (bez literatury, použitých zkratk, seznamu tabulek a obrázků, a příloh). Součástí dizertace je též 55 obrázků a 10 tabulek v hlavní části textu. Další obrázky a tabulky jsou v přílohách práce. Obrázky jsou ve velmi dobré kvalitě a přispívají ke srozumitelnosti textu, prezentaci výsledků i celkově k velmi příznivému dojmu z předložené práce. Dizertační práce je napsána v anglickém jazyce. Přestože použití anglické gramatiky není vždy zcela bezproblémové, je nutné autora za snahu zpřístupnit výsledky své práce široké mezinárodní komunitě pochválit.

Text disertační práce je členěn v návaznosti na cíle uvedené v jejím úvodu. Autor postupně diskutuje vývoj výškových systémů na území dnešního Česka a Slovenska, základy tíhového pole Země, strategii realizace globálního výškového systému (výškového rámce) včetně dvou metod pro integraci lokálních výškových systémů, a jejich aplikace na dvě konkrétní realizace lokálního výškového systému v České republice a Slovenské republice. Dosažené výsledky jsou shrnuty v závěru disertační práce, kde jsou též diskutovány možnosti dalšího postupu, význam a využití dosažených výsledků v praxi.

K formální úpravě textu nemám mnoho připomínek. Vyčlenění matematických základů, části odvození, obrázků či programů do příloh vede k lepší čitelnosti hlavního textu. Matematické výrazy či vztahy vykazují jen drobné nedostatky, které se týkají definice či použití některých symbolů. Text dizertace mohl být také lépe členěn. V úvodu práce mohl být též popsán účel realizace jednotného výškového systému, důvody současného vývoje i přehled vybraných mezinárodních aktivit v této oblasti. Kapitoly 3, 4 a 5 pak mohly být členěny přehledněji se zdůrazněním osobního příspěvku autora. V jedné kapitole mohly být diskutovány základy realizace globálního výškového rámce; dvě navržené metody pro integraci lokálního výškového rámce včetně souvislostí mohly být předmětem textu dvou samostatných kapitol.

Seznam použité literatury je poměrně rozsáhlý a svědčí o značném odborném přehledu doktoranda. Jednotlivé položky v seznamu jsou vysázeny pečlivě, překlepů je velmi málo. Při zevrubné kontrole seznamu literatury se mi nepodařilo najít chybějící či naopak nadbytečné odkazy.

Z pohledu příspěvku doktoranda jsou významné především kapitoly 4, 5 a 6, které zahrnují formulaci dvou metod řešení problému, jejich implementaci a použití ve dvou testovacích lokalitách. Autor v těchto částech dizertační práce uvádí původní výsledky, které ověřují správnost a použitelnost metod v praxi.

3. Postup řešení problému, výsledky disertace a konkrétní přínos doktoranda

Autor ve své práci rozvíjí postupy, které jsou založeny na standardních řešeních používaných v geodézii. Tato řešení jsou používána novým či inovativním způsobem v kontextu realizace světového výškového systému, což je možno považovat za konkrétní příspěvek autora pro jeho implementaci. Navržené metody řešení cílů práce, které nevykazují zásadní nedostatky, byly implementovány a ověřeny s použitím dostupných dat pro integraci dvou realizací lokálního výškového systému. Text práce není zcela prost dílčích nedostatků, které ale nemají zásadní vliv na celkové hodnocení práce a nesnižují význam příspěvku doktoranda. Vybrané připomínky jsou uvedeny níže v členění dle jednotlivých kapitol.

Kapitola 1. V této části práce je popsán historický vývoj výškových systémů České republiky a Slovenské republiky, na kterých jsou navržená řešení problému testována. Z pohledu řešení jsou důležité základní parametry lokálních výškových systémů, jako jsou typ použitých výšek, definice referenční hladiny, její konkrétní realizace a způsob určení výšek. Historický vývoj je zajímavý, ale důležitý je především současný stav: výškové systémy obou zemí používají normální výšky dle Moloděnského, kvazigeoid ztotožněný se střední hladinou Baltského moře za určité období měření na vodočtu v ruském přístavu Kronštadt a společné vyrovnání propojených nivelačních sítí zemí bývalého východního bloku.

Kapitola 2. V této kapitole jsou uvedeny základy teorie potenciálu a metody popisu tíhového pole Země používané v geodézii:

- Na straně 25 jsou uvedeny jisté předpoklady, které se týkají vektorového tíhového pole, které umožňují zavedení vztahu, viz rovnice (2.4), mezi vektorovým parametrem tíhové zrychlení a skalárním parametrem tíhový potenciál: konzervativnost, viz rovnice (2.2), a netočivost, viz rovnice (2.1), tíhového pole. Důležité je pořadí předpokladů a jejich důsledek. Obě předpokládané vlastnosti tíhového pole lze splnit při jistém zjednodušení reálných vlastností Země a jejího tíhového pole (např. nezávislost na čtvrtém rozměru – času). V realitě podléhá časovým změnám zemské tíhové pole, (kvazi)geoid i výšky.
- Vztah potenciálu (tíhového či gravitačního) k příslušnému vektoru zrychlení je dán rovnicí (2.4). V textu pod touto rovnicí se píše, že vektor zrychlení je roven negativní hodnotě gradientu potenciálu, což ale neodpovídá zápisu v rovnici. Použitá znaménková konvence souvisí s definicí souřadného systému, který je použit. Lze porovnat s podobným vztahem v rovnici (2.19).
- Na stránce 26 v druhém odstavci je uvedeno, že geoid je zpravidla určen geometrickou nivelací. Toto tvrzení lze rozporovat, neboť geoid je zpravidla řešen pomocí dat družicové altimetrie (vodní plochy) a z měřených hodnot rozdílů či gradientů tíhového/gravitačního potenciálu (pozemních, leteckých či družicových).

- Rovnice (2.8) je Poissonova diferenciální rovnice („rovnice pole“), která v daném bodě 3D prostoru definuje vztah mezi statickým tíhovým potenciálem na straně jedné, a měrnou hmotností a rotační úhlovou rychlostí Země na straně druhé. Vztah platí pro bod uvnitř i vně gravitujících hmot. Regularita gravitačního potenciálu v nekonečně velké vzdálenosti od gravitujících hmot je důsledkem Newtonova gravitačního zákona.
- Část 2.1.2: Normální tíhové pole rotujícího hladinového elipsoidu aproximuje dostatečně dobře tíhové pole skutečné Země s nepravidelným tvarem a nerovnoměrným rozložením hmot. U rovnice (2.11) by bylo možno uvést, že hodnota normálního potenciálu na povrchu hladinového elipsoidu by ideálně měla být rovna hodnotě tíhového potenciálu Země na geoidu.
- Rovnice (2.15) zavádí analytický popis normálního tíhového pole pomocí sférické harmonické řady, ze které vyplývají jisté symetričnosti tohoto pole. Přestože je řada nespočetná, její praktický výpočet umožňuje použití malého počtu členů rozvoje. Aplikací operátoru gradient lze takto napočítat normální tíhové zrychlení, viz též rovnice (2.17) platné pouze pro povrch elipsoidu, kdekoli na povrchu i vně elipsoidu. První numerická excentricita elipsoidu je zpravidla definována jako e^2 .
- Rovnice (2.18) umožňuje analytické prodloužení normální tíže do bodu vně elipsoidu po normále k jeho povrchu. Jedná se o rozvoj normálního tíhového zrychlení (analytické funkce polohy) do řady jejích gradientů (známé v matematice jako Taylorova řada), přičemž se použijí pouze gradienty prvního a druhého řádu. Jedná se tedy pouze o přibližný vztah. Bezrozměrný parametr m je též označován jako geodetický parametr.
- Sekce 2.1.3 opět uvádí, že normální tíhové pole poskytuje „a very solid approximation“ skutečného tíhového pole. Toto tvrzení mohlo být v práci kvantifikováno.
- Rovnice (2.25) není v souladu s rovnicí (2.19).
- Složky tížnicové odchylky bývají v anglickém jazyce zpravidla označovány jako „meridian (south-north)“ a „prime-vertical (east-west)“. Je vůbec nutné definovat pro účely práce tížnicové odchylky?
- Je opravdu nutné použít pro výpočet normálního potenciálu ve vnějším prostoru elipsoidu aparát v části 2.2.1 s použitím křivočarých elipsoidických souřadnic?
- Operátor „ \cdot “ by měl zůstat vyhrazen pro skalární součin dvou vektorů, viz rovnice (2.13).
- V části 2.3 by bylo korektní zmínit, že realizaci světového výškového systému koordinuje Mezinárodní geodetická asociace (IAG), která má ve své struktuře organizační útvary, které se tomuto tématu věnují (např. Komise 2 – tíhové pole Země, Globální geodetický observační systém, Mezikomisní komitét pro teorii atd.). Část 2.3 má velmi ambiciózní cíl poskytnout přehled současného stavu výškových systémů v různých částech světa, který nebyl zcela naplněn.
- V tabulce 2.3 jsou uvedeny typy výšek používané v různých evropských zemích. Základní typy výšek (ortometrické a normální) by měly být v tabulce rozlišeny včetně různých typů výšek ortometrických (vždy se jedná pouze o jistou aproximaci), případně také výšek normálních (např. používá Francie normální výšky Vignalovy či Moloděnského?).
- Rovnice (2.44) uvádí výpočet normální tíže (není konstantou γ_0) na povrchu referenčního (hladinového) elipsoidu jako funkci geodetické šířky tj. $\gamma(\varphi)$.
- V rovnici (2.35) je hodnota v čitateli rovna integrální střední hodnotě normální tíže podél tížnice normálního pole. Tato hodnota je aproximována hodnotou v polovině normální výšky vztážené k referenčnímu elipsoidu; nechybí v tomto vztahu zlomek $3/2$ v posledním členu v závorce, viz též rovnice (2.18)?

Kapitola 3. V této kapitole dizertační práce je diskutován teoretický rámec pro realizaci světového výškového systému:

- Konec stránky 37: Správná forma jména Stokes v přívlastku je Stokes's (podobně jako Hotine's, Poisson's atd.). Matematik Gabriel Stokes vyřešil úlohu určení tvaru Země ve smyslu hladinové plochy aproximující střední hladinu světového oceánu z tíhových data měřených na povrchu Země pomocí okrajové úlohy teorie potenciálu. Geoid lze ale řešit i jinak než pomocí BVP, např. kolokací či (sférickými) radiálními funkcemi.
- Rovnice (3.1) platí pouze přibližně. Geodetická (elipsoidická) výška bývá také označována písmenem h , aby se odlišila od fyzikálně definovaných výšek označovaných zpravidla písmenem H s příslušným indexem.
- Stokes řešil poruchový potenciál pomocí BVP z tíhové anomálie ve smyslu známé spojité funkce polohy na referenční kouli. Okrajová podmínka v rovnici (3.3) je pak v jiném tvaru. Je patrné, že tíhová anomálie je ve skutečnosti funkcí polohy dvou bodů. Zdůvodnění použití sférické formulace BVP je velmi důležité (dané neschopností měřit výšky nad referenčním elipsoidem před nástupem družicové navigace).
- Brunsův vztah (Bruns's) v rovnici (3.9) je pouze přibližný (ve sférické aproximaci přesný).
- Část 3.2.1 by se též mohla jmenovat „Spectral decomposition of the geoid“. V rovnici (3.10) řada obsahuje i členy stupně nula a jedna. Ze spektrální definice Stokesovy funkce pomocí řady Legendreových funkcí, viz rovnice (3.7), je patrné, že tyto členy nelze řešit pomocí rovnice (3.5). V případě citace monografií (např. Heiskanen and Moritz 1967) se zpravidla uvádí číslo rovnice, číslo kapitoly či stránky.
- Část 3.2.2: Helmertovy výšky jsou pouze přibližné ortometrické výšky, kde je střední hodnota tíže (v integrálním smyslu) mezi povrchem Země a geoidem opět nahrazena hodnotou tíže v polovině výšky určené z měřené hodnoty na povrchu a prodloužené pomocí lineárního gradientu tíže definovaného s použitím střední hodnoty měrné hmotnosti topografických hmot (aproximace výpočtu se týká jak měrné hmotnosti, tak lineární změny tíže resp. použití věty o střední hodnotě). Ortometrické a normální ortometrické výšky: jaký je mezi nimi rozdíl? Vychází z měřené hodnoty tíže na zemském povrchu?
- Rovnice (3.19): anomální potenciál (pozor na symbol Delta evokující operátor Laplacián, viz rovnice 2.10) je stejně jako tíhová anomálie funkcí poloh dvou bodů (P a Q).

Kapitola 4. V této kapitole dizertační práce jsou diskutovány praktické aspekty metody řešení na základě okrajových úloh:

- Na straně 57 je zmíněna kolokace jako další možná metoda řešení transformace poruchové (či anomální) tíže na tíhový potenciál. Jsou zde zmíněny jisté výhody této metody, ale v rámci korektní argumentace by bylo vhodné zmínit též její nevýhody či slabiny. Existují ale i další postupy řešení této transformace.
- V druhém odstavci na straně 57 je popsán výpočet, důležité parametry a vstupní data. Při použití metody RCR byla dlouhovělná část kvazigeodu napočtena harmonickou syntézou (do stupně 164), další část byla napočtena integrací tíhových anomálií napočtených také metodou harmonické syntézy (stupeň 165-2190) a zbytek (odpovídající stupni 2191 a výše) byl dopočten metodu RTC. Volba jednotlivých parametrů (např. hraniční stupeň či poloměr integrace) by si jistě zasloužily jistou diskuzi. Náhrada měřených hodnot tíže EGM: použité globální modely tíhového pole poměrně dobře reprezentují potenciál, ale méně dobře jeho gradienty (tíhové anomálie). Použitý postup mohl být použit k ověření funkčnosti numerického integrátoru.

- V rovnicích (4.1) a (4.2) není jasné použití kvantifikátorů omezující stupně řady.
- Část 4.2: použití FFT pro numerický výpočet plošných integrálů v geodézii je dobře známo. Stačilo by diskutovat seminární práce vytvořené na Univerzitě v Calgary (Sideris et al.) a v Delftu (Haagmans et al.), které FFT do geodézie uvedly či nastavily její správné použití (1D FFT na kouli).

Kapitola 5. V této kapitole dizertační práce je vysvětlena problematika přímého modelování potenciálních polí, zde gravitačního potenciálu a jeho funkcionalů. Autor diskutuje varianty výpočtu pomocí analytických výrazů odvozených pro jednoduché objemy, do kterých jsou topografické hmoty rozloženy. Za zmínku stojí možnost aproximace tíhového pole s použitím sférické řady. Důležitým aspektem přímého modelování je volba modelu rozložení měrné hmotnosti (střední hodnota, laterální model atp.). Mezi použitými modely topografie jsou významné rozdíly. Výsledkem leteckého mapování v ČR jsou nové modely topografie, které mají vysokou přesnost a vysoké prostorové rozlišení. Bylo zvažováno jejich použití?

Kapitola 6. V této kapitole jsou uvedeny výsledky dosažené aplikací dvou navržených metod integrace realizací lokálního výškového systému do realizace světového výškového systému.

- První metoda („FAST GVBP“) využívá pro stanovení vazby mezi lokální a globální realizací výškového systému množiny bodů, na kterých byla určena výška nivelací a GNSS.
- Matematický model je dán rovnicí (6.3), kde je rozdíl mezi lokálním a globálním modelem kvazigeoidu interpretován ve smyslu posunu a náklonů ve směru sever-jih a východ-západ. Tři neznámé parametry a_i ($i \gg 3$) určených rozdílů vedou k odhadu neznámých dle MNČ společně s odhadem středních chyb. Není jasná volba metriky vektoru odchylek (matice Q_{ii}). Matice a vektory lze označit tučně, vektory malým písmem a matice velkým.
- Jak byla zvolena hodnota bezrozměrného měřítka této matice (apriorní varianční faktor či střední chyba jednotkové váhy). Bylo nutné provést operaci v rovnici (6.5)? Byl proveden příslušný test? Pokud byla vstupní hodnota tohoto měřítka rovna 1 (a jednotková byla i celá matice Q_{ii}), pak zřejmě ano.
- Kovarianční matici bych označoval stále stejným symbolem (možno rozlišit jinak), a to i po operaci naznačené v rovnici (6.5). Prvky na hlavní diagonále matice v rovnici (6.7) představují MNČ odhady střední kvadratické chyby příslušných parametrů, resp. jejich odhadů. Jaké jsou numerické hodnoty prvků mimo hlavní diagonálu? Nějaké výrazné hodnoty indikující větší korelace určených parametrů resp. neschopnost matematického modelu rozlišit jednotlivé odhady?
- Hodnoty v tabulce 6.1 a jinde by bylo vhodné uvádět na stejný počet platných číslic. Vzhledem k hodnotám bych použil místo základní jednotky délky metr např. centimetr. Hodnota směrodatné odchylky je dle definice kladná, přestože se jedná o odmocninu jiného parametru.
- V části 6.3.2 jsou uvedeny histogramy indikující rozložení určených rozdílů (mezi lokální a globální realizací výškového systému) a příslušných residuí pro jednotlivá řešení. Na první pohled histogramy indikují normálně rozložené soubory, což bylo možno též otestovat. Význam této vlastnosti souborů pro odvozená řešení mohl být též zmíněn.
- Druhá metoda je označena jako „Classical GVBP approach“. Proč byl pro výpočet použit WGS84 elipsoid? Lze odhadnout vliv použití skutečných hodnot měřeného tíhového zrychlení na výsledky této metody?
- Byly výsledky obou navržených metod integrace realizace lokálního výškového systému nějak porovnány a diskutovány?

4. Splnění stanoveného cíle disertace

Cílem dizertační práce Ing. Budaye bylo navrhnout řešení pro integraci lokálních výškových systémů používaných v různých částech světa do v současnosti realizovaného globálního výškového systému. Doktorand navrhl dvě metody řešení, která využívají lokální nivelační, GNSS a tíhová data, globální modely tíhového pole a topografie Země. Tyto metody byly úspěšně otestovány na lokálních výškových systémech používaných v Česku a Slovensku. Stanovené cíle dizertační práce byly dle mého názoru splněny.

5. Význam dosažených výsledků pro obor a praxi

Realizace jednotného světového výškového systému je v současnosti hlavním projektem mezinárodní geodetické komunity. V minulosti geodézie realizovala globální referenční rámce pro 3D polohu a tíži. Vytvoření podobného rámce pro fyzikálně definované výšky, a s tím související integrace lokálních výškových rámců, bylo dlouze diskutováno geodetickou komunitou, nicméně k naplnění tohoto cíle bylo přistoupeno až v současnosti. Výsledky prezentované v dizertační práci Ing. Budaye tvoří příspěvek pro řešení problému související s integrací lokálních výškových systémů do globálního výškového systému. Sjednocení výškových systémů přinese mnoho potenciálních výhod pro obor geodézie (sledování pohybů zemského povrchu ve fyzikálně definovaném výškovém systému a kvantifikace jejich dopadu na určování polohy, definici globálních geodetických referenčních systémů a jejich realizaci) i inženýrskou praxi (např. velké stavební projekty).

Závěrečné zhodnocení dizertace a doporučení:

Doktorand ve své dizertační práci prokázal, že je odborníkem v oboru geodézie schopným samostatné vědecké práce vysoké úrovně. Předložená dizertační práce splňuje podmínky dle § 47 odst. 4 zákona 111/1998 Sb.: dizertační práce obsahuje původní a částečně uveřejněné výsledky výzkumné činnosti doktoranda řešící aktuální oborové problémy odpovídajícího rozsahu a komplexnosti.

Předloženou doktorskou dizertaci hodnotím kladně a doporučuji ji přijmout k obhajobě.

V Plzni, dne 27. 1. 2021

.....
prof. Ing. Pavel Novák, PhD.