

Metodika pro stanovení sezónních změn tíhového zrychlení na vybraných absolutních tíhových bodech pomocí opakovaných měření absolutními gravimetry

Konečný uživatel výsledků: **Český úřad zeměměřický a katastrální**
Pod sídlištěm 1800/9, 182 11 Praha 8 Kobylisy

Název projektu: Zvýšení přesnosti a spolehlivosti určení tíhového zrychlení na absolutních tíhových bodech v ČR

Číslo projektu: TITSCUZK704

Řešitel projektu: Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický, v.v.i., Ústecká 98, 250 66 Zdíby

Doba řešení: 1. 1. 2019 – 30. 12. 2021

Důvěrnost a dostupnost: veřejně přístupný

Informace o autorském týmu:

doc. Ing. Jakub Kostecký, Ph.D.

Ing. Vojtech Pálinkáš, Ph.D.

**Další informace o projektu:**

Cílem projektu je vytvoření metodiky pro určení vertikálních gradientů tíhového zrychlení (zejm. za účelem přenosu hodnoty tíhového zrychlení z referenčního bodu absolutního gravimetru do úrovně stabilizace tíhového bodu). Dalším cílem je vytvoření metodiky pro stanovení sezónních změn tíhového zrychlení (zejm. na základě experimentálně ověřených hydrologických vlivů) a vytvoření metodiky pro jednotné zpracování absolutních tíhových měření (se zahrnutím jak stávajících, tak nově zjištěných přístrojových oprav i z lokálního vlivu okolního prostředí).

Úvod

Tento dokument je jedním z výstupů řešení projektu TITSCUZK704 „Zvýšení přesnosti a spolehlivosti určení tíhového zrychlení na absolutních tíhových bodech v ČR“ programu BETA2 Technologické agentury ČR. Je výstupem 12. kvartálu řešení projektu ve formě finální podoby „Metodiky stanovení sezónních změn tíhového zrychlení na vybraných absolutních tíhových bodech pomocí opakovaných měření absolutními gravimetry“.

Cíl metodiky

Cílem metodiky je definování způsobu stanovení sezónních změn tíhového zrychlení na absolutním tíhovém bodě pomocí opakovaných měření absolutními gravimetry, tj. popsání způsobu vytvoření modelu sezónních změn na základě stanoveného počtu měření absolutním gravimetrem na bodě ve vhodných ročních obdobích během alespoň dvou let. Určení modelu umožní stanovit s jistou přesností aktuální hodnotu tíhového zrychlení na bodě pro provádění připojovacích gravimetrických měření v rámci České státní gravimetrické sítě.

Definovaný způsob umožňuje určit velikost roční amplitudy a fáze sezónních změn vyjádřené harmonickou funkcí. Jejich případná meziroční proměnlivost musí být zohledněna při stanovení přesnosti modelu sezónních změn. Aplikuje též postup pro případ, že se nepodaří prokázat, že sezónní změny tíhového zrychlení zjištěné na absolutním tíhovém bodě mají charakter periodicky se opakujícího jevu.

Výchozí podklady

Po provedení rešerše dostupných podkladů bylo konstatováno:

- Při měření tíhového zrychlení je třeba určit a eliminovat systematický instrumentální vliv použitého absolutního gravimetru (*Pálinkáš a kol. 2013*).
- Při určování hodnoty tíhového zrychlení na absolutním tíhovém bodě je nutno vzít v potaz vliv sezónních změn tíhového zrychlení, které mají pro každý bod individuální amplitudu a fázi (*Kostelecký a Pálinkáš 2017*), z čehož dále plyne: a) jedno měření tíhového zrychlení v roce je ovlivněno sezónní změnou tíhového zrychlení neznámé a neurčitelné velikosti, b) při provedení dvou měření není jisté, že budou provedena v období maxima a minima sezónních změn na bodě, c) z alespoň tří měření v roce je možné určit jak amplitudu, tak fázi (*Pálinkáš a Val'ko 2014*).
- Amplituda sezónních změn tíhového zrychlení je proměnná v jednotlivých letech (*Weise a kol. 2012*) v závislosti na globálním i regionálním klimatu (laicky řečeno: zda je suché nebo deštivé léto); pokud to podmínky dovolí, měla by být prověřena variabilita sezónních změn na jednotlivých bodech.

Stanovení vhodných pracovních postupů s vazbou na užitý měřicí přístroj – absolutní gravimetr

Stanovením sezónních změn tíhového zrychlení na absolutních tíhových bodech se rozumí stanovení fáze a amplitudy harmonické funkce s roční periodou, která popisuje změnu tíhového zrychlení způsobenou zejména hydrologickými vlivy jak v nejbližším okolí bodu, tak v regionálním a globálním měřítku (*Van Camp a kol. 2014*). Velikost fáze a amplitudy se může v jednotlivých letech měnit, jak je patrné z řady stanic (*Weise a kol. 2012*). Nejspolehlivější určení sezónních změn tíhového zrychlení je dle *Van Camp a kol. (2013)* pomocí kombinace kontinuálního relativního měření supravodivého gravimetru a epochových měření absolutního gravimetru. To – vzhledem k pořizovací ceně, provozním nákladům a značné komplikovanosti přesunu supravodivého gravimetru – není cesta, kterou by bylo možno navrhnout a prakticky používat v prostředí České republiky.

Vhodný pracovní postup je založen na následujících bodech:

1. Pro opakovaná měření je nejvhodnější použít identický absolutní balistický gravimetr (pro eliminaci systematických vlivů rozdílných gravimetrů), případně absolutní gravimetry, které jsou pravidelně porovnávány. V případě, že během realizace opakovaných měření dojde k závadě v gravimetru, kterou nebude možno včas opravit, bude použit jako záloha jiný absolutní balistický gravimetr. Rozdíl systematických vlivů obou gravimetrů musí být určen např. při srovnávacích měřeních, nebo měření na referenčních stanicích.
2. Délka měření (počet volných pádů) je 12 až 16 hodin na jednom bodě a počet pádů minimálně 1500 (u balistických gravimetrů typu FG5 a FG5X).
3. Pro dostatečně spolehlivé určení amplitudy a fáze sezónních změn musí být na každém sledovaném bodě provedeno alespoň šest měření během minimálně 24 měsíců. Soubor těchto měření by měl obsahovat alespoň 2 měření na jaře (předpoklad maximálního tíhového zrychlení) a 2 na podzim (předpoklad minimálního tíhového zrychlení).
4. Dříve provedená absolutní tíhová měření na vybraných bodech mohou být využita, pokud je bude možno nově zpracovat se zavedením všech dnes známých oprav (na základě metodiky pro zpracování měření absolutními gravimetry se zavedením všech oprav).

Použité přístroje a pomůcky

Základním přístrojem pro určování sezónních změn tíhového zrychlení je absolutní balistický gravimetr – buď model FG5 nebo model FG5X (oba mají srovnatelnou standardní nejistotu $u = 2,2 \cdot 10^{-8} \text{ m s}^{-2}$ tj. $2,2 \text{ } \mu\text{Gal}$ a dlouhodobou opakovatelnost $u_s = 1,2 \cdot 10^{-8} \text{ m s}^{-2}$ tj. $1,2 \text{ } \mu\text{Gal}$). Měření provedená stejným gravimetrem (případně gravimetry, které se pravidelně srovnávají) jsou tedy výrazně korelovaná. Zvýšením počtu měření se snižuje pouze stochastická část (u_s) nejistoty měření.

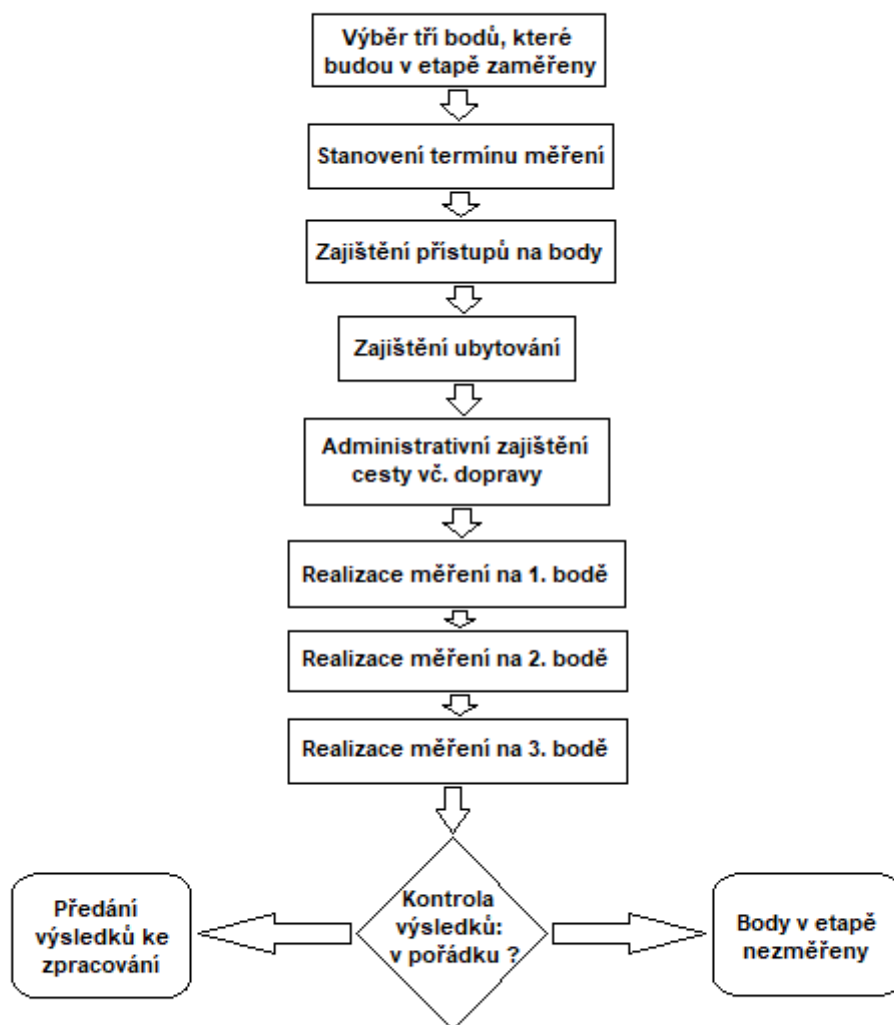
Systematická složka nejistoty ($u_c = \sqrt{2,2^2 - 1,2^2} = 1,84 \text{ } \mu\text{Gal}$) se navýšením počtu měření nezmění.

Dále jsou používány výpočetní prostředky pro zpracování dat.

Postup měřických prací

Realizace absolutních měření na absolutních bodech probíhá v následujících krocích – viz též obr. 1:

- Absolutní body, na kterých jsou určovány sezónní změny, jsou rozděleny do množin po třech bodech tak, aby přejezdy mezi body byly co nejkratší a danou množinu bylo možné zaměřit během 1 týdne.
- Výběr množiny tří bodů, které budou zaměřeny v dané etapě (jaro, léto, podzim) – vybírány budou přednostně body, které mají v dané etapě nejméně měření – i s uvažováním dřívějších měření, které vyhovují kritériím a budou převzaty do zpracování.
- Stanovení termínu – týdne měření.
- Zajištění přístupů vč. klíčů a dohody o přístupu k bodu v nočních hodinách.
- Zajištění ubytování pro pracovníky obsluhující gravimetr.
- Administrativní zajištění cesty vč. rezervace automobilu.
- Realizace absolutního měření – minimálně 1500 pádů – 12 až 16 hodin – větší část pokud možno v nočních hodinách – postupně na třech bodech.
- Kontrola výsledků – zda není potřebné rozšířit měření.
- Předání výsledků k dalšímu zpracování.



Obr. 1 – Jednoduché procesní schéma měření absolutním gravimetrem pro určování sezónních změn tíhového zrychlení

Zpracování výsledků měření

Primární měřená data (časy, kdy signál z interferenčních proužků prochází nulou, z každého realizovaného volného pádu) budou zpracována podle metodiky pro jednotné zpracování absolutních měření tíhového zrychlení se zavedením všech (vč. nedávno zjištěných) oprav z instrumentálních vlivů. Výsledkem zpracování jsou průměrné hodnoty tíhového zrychlení na daném bodě v dané etapě.

Definování modelu sezónních změn

Při definování modelu sezónních změn je třeba uvážit, že ne ve všech případech jsou změny tíhového zrychlení na absolutních bodech, způsobené zejména hydrologickými vlivy, periodického charakteru vyjádřené v našem případě harmonickou funkcí. První představu lze získat z grafu časových řad tíhových zrychlení změřených na bodech a z hodnocení statistické významnosti určených parametrů sezonního signálu – viz dále.

Model změn lze předpokládat ve dvou variantách v závislosti na tom, zda na absolutním bodě dochází ke změně tíhového zrychlení v důsledku geodynamiky, kdy aproximujeme tuto změnu v čase pomocí polynomu 1. stupně, tj. model definujeme následovně

$$g_{AG}(t) + v = g_0 + D t + S_1 \cos(\omega t) + S_2 \sin(\omega t) \quad (1)$$

a v případě bez lineární změny v čase

$$g_{AG}(t) + v = g_0 + S_1 \cos(\omega t) + S_2 \sin(\omega t), \quad (2)$$

kde

$g_{AG}(t)$ [μGal] ... jsou hodnoty tíhových zrychlení z absolutních měření v časech t [rok].

g_0 [μGal] ... je konstantní člen v čase $t_0=0$,

D [μGal/rok] ... je trend – lineární změna tíhového zrychlení způsobená geodynamikou,

S_1, S_2 ... jsou sinové a cosinové amplitudy sezónního signálu, jehož perioda je 1 rok a úhlová rychlost tedy $\omega = 2\pi$.

Pro vyhodnocení souboru měření (alespoň šestkrát za dva roky) na konkrétním tíhovém bodě použijeme k výpočtu parametrů g_0, S_1, S_2 metody nejmenších čtverců (MNC). Pokud je určen i trend D , je nutno použít měření z více (alespoň 3-4) let. Odhady parametrů pomocí MNC tedy získáme řešením normálních rovnic

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{g}, \quad (3)$$

kde \mathbf{x} je vektor určovaných parametrů, \mathbf{A} je matice plánu, \mathbf{g} vektor měření a \mathbf{P} je odpovídající váhová matice měření, která je určena inverzí kovarianční matice měření \mathbf{C}_g ($\mathbf{P} = \mathbf{C}_g^{-1}$). Kovarianční matice měření je sestavena ze známých hodnot nejistot měření \mathbf{u} (u^2 jsou diagonální členy \mathbf{C}_g) a příslušné systematické složky nejistoty měření \mathbf{u}_c (u_c^2 jsou ty nediagonální členy \mathbf{C}_g , které odpovídají měření stejným gravimetrem).

Důležitým výsledkem jsou také odhady středních chyb a nejistot určovaných parametrů (g_0, S_1, S_2, D), které se liší násobkem střední jednotkové chyby

$$m_0 = \sqrt{\frac{\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v}}{r}}, \quad (4)$$

kde \mathbf{v} je vektor oprav a r je počet nadbytečných měření. Zatímco nejistoty určovaných parametrů získáme z kovarianční matice určovaných parametrů $\mathbf{C}_x = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1}$ jako odmocniny diagonálních členů $u_{x_i} = \sqrt{C_{x_{ii}}}$, tak odpovídající střední chyby jsou normované pomocí střední jednotkové chyby $m_{x_i} = m_0 u_{x_i}$. Pro další hodnocení významnosti určení jednotlivých parametrů se použije w_{x_i} , přičemž $w_{x_i} = \max(u_{x_i}, m_{x_i})$.

Harmonická funkce nemusí s dostatečnou přesností vyjadřovat sezónní změny na bodě. V případě, že určené sinové a cosinové amplitudy jsou statisticky nevýznamné na hladině významnosti 95 %, tj. $S_1 < q w_{S_1}$ a zároveň $S_2 < q w_{S_2}$, kde q je kritická hodnota Studentova t-rozdělení na hladině významnosti $\alpha = 5\%$ s r stupni volnosti, bude tíhové zrychlení na bodě reprezentováno vlastně průměrnou hodnotou podle modelu

$$g_{AG}(t) + v = g_0. \quad (5)$$

Také trend nemusí s dostatečnou přesností vyjadřovat lineární změnu tíhového zrychlení na bodě. V případě, že určený trend je statisticky nevýznamný na hladině významnosti $\alpha = 5\%$, tj. $D < q w_D$ (q je kritická hodnota Studentova t-rozdělení – viz výše), nelze trend v modelu uvažovat.

V případě, že sinové a kosinové amplitudy harmonické funkce nejsou statisticky významné, ale trend je statisticky významný, bude tíhové zrychlení na bodě reprezentováno podle modelu

$$g_{AG}(t) + v = g_0 + D t. \quad (6)$$

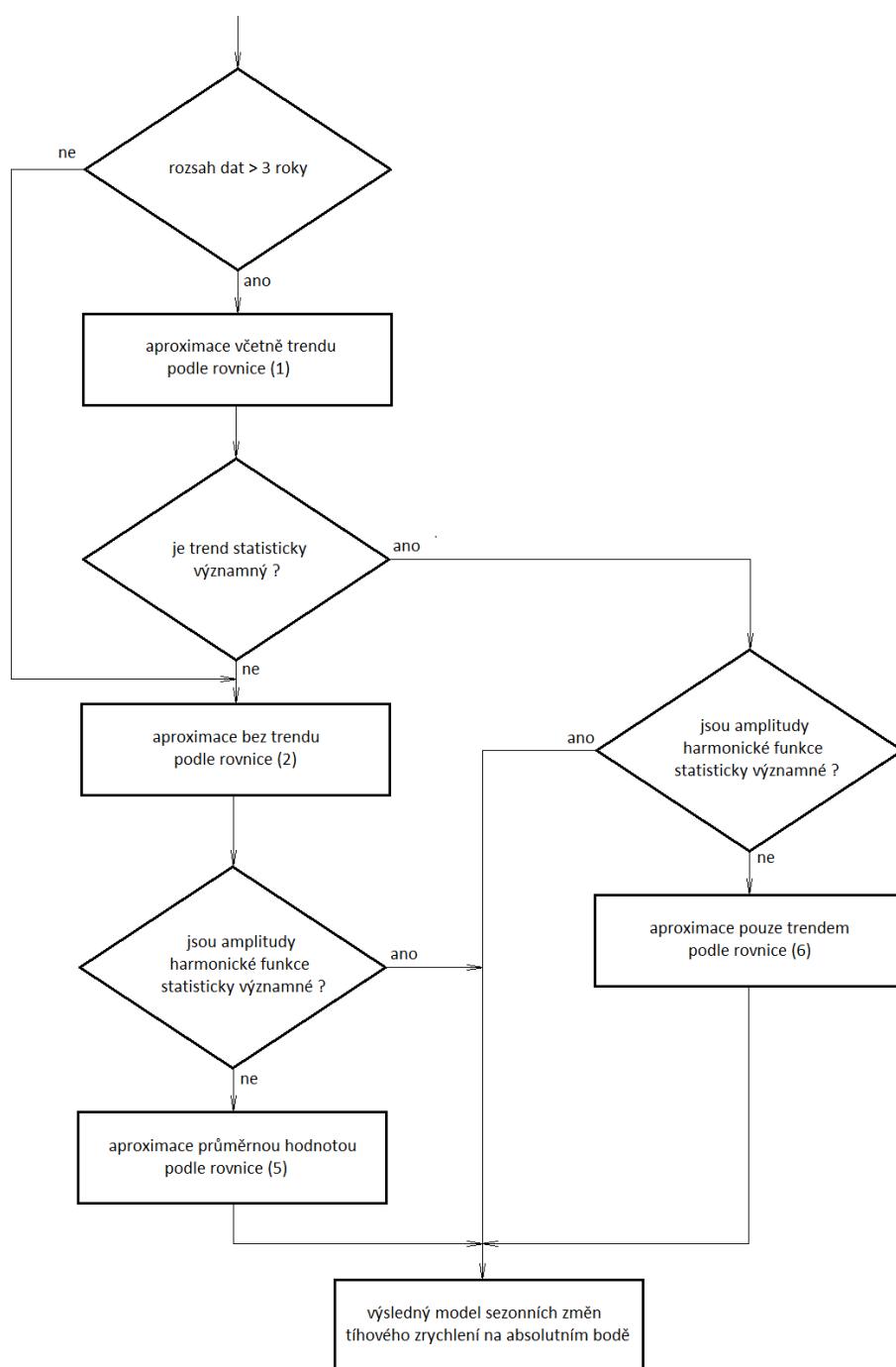
Poznamenejme, že střední jednotková chyba m_0 je odhadem statistické variability výsledků v důsledku opakovatelnosti gravimetru (u_s), a zejména v důsledku variability tíhového zrychlení na tíhovém bodě. Vyjadřuje také vliv nepřesnosti v popisu reálné variability tíhového zrychlení pomocí použitého modelu. Nejistotu tíhového zrychlení v libovolném čase je možné stanovit z následujících z příspěvků nejistot: 1) systematické složky nejistoty absolutních měření ($u_c = 1,84 \mu\text{Gal}$), 2) střední jednotkové chyby m_0 , tedy

$$u_{gt} = \sqrt{u_c^2 + m_0^2}. \quad (7)$$

Popsané modely jsou vhodné pro aproximaci tíhového zrychlení na absolutních bodech Základního tíhového bodového pole v České republice. Meziroční změny fáze a velikosti amplitudy model nepopisuje a jsou zahrnuty do celkové nejistoty (7). Určení meziroční změny fáze je možné na stanicích s kontinuálním sledováním tíhového zrychlení v kombinaci supravodivého a absolutního gravimetru. Případná meziroční změna fáze výrazně neovlivní celkovou přesnost modelu.

Procesní schéma pro definování modelu sezónních změn

V obr. 2 je shrnut postup jednotlivých kroků pro definování vhodného modelu sezónních změn tíhového zrychlení na absolutním bodě na základě opakovaných absolutních měření tíhového zrychlení.



Obr. 2 – jednoduché procesní schéma pro definování modelu sezónních změn tíhového zrychlení

Závěr

V rámci 12. etapy byla vyhotovena finální verze metodiky, jejíž text je uveden předchozích odstavcích.

Citovaná literatura

Kostecký J., Pálinkáš V. (2017): Národní doplnění Evropské kombinované geodetické sítě (ECGN) v České republice. Sborník ze semináře s mezinárodní účastí „Družicové metody v geodézii a katastru“, Vysoké učení technické v Brně, 2.2.2017, ISBN 978-80-86433-64-6, str. 29-34.

Pálinkáš V., Lederer M., Kostecký J., Šimek J., Mojzeš M., Ferienc D., Csapo G. (2013): Analysis of repeated absolute gravity measurements in the Czech Republic, Slovakia and Hungary from the period 1991-2010 considering instrumental and hydrological effects. Journal of Geodesy, Vol. 87, No. 1, pp. 29-42, DOI: 10.1007/s00190-012-0576-1.

Pálinkáš V., Val'ko M. (2014): Metodika detekce časových změn tíhového pole z opakovaných terestrických gravimetrických měření. Technická zpráva č. 1227/2014, VÚGTK, Zdiby, 2014.

Van Camp M.J., de Viron O., Warburton R.J. (2013): Improving the determination of the gravity rate of change by combining superconducting with absolute gravimeter data. Computers & Geosciences, Vol. 51, pp. 49-55, DOI: 10.1016/j.cageo.2012.07.029.

Van Camp M.J., de Viron O., Métivier L., Meurers B., Francis O. (2014): The quest for a consistent signal in ground and GRACE gravity time-series. Geophysical Journal International, Vol. 197, No. 1, April 2014, pp. 192-201, DOI: 10.1093/gji/ggt524.

Weise A., Kroner C., Abe M., Creutzfeld B., Förste C., Güntner A., Ihde J., Jahr T., Jentzch G., Wilmes H., Wziontek H., Petrovic S. (2012): Tackling mass redistribution phenomena by time-dependent GRACE- and terrestrial gravity observations. Journal of Geodynamics, Vol. 59-60, September 2012, pp. 82-91, DOI: 10.1016/j.jog.2011.11.003.

T A
Č R

Tento projekt je financován se státní podporou
Technologické agentury ČR
v rámci programu BETA2

www.tacr.cz
Výzkum užitečný pro společnost



[poslední strana]