

Metodika postupu měření a zpracování pro přesné určení vertikálního gradientu tíhového zrychlení na absolutních tíhových bodech pomocí relativních gravimetrů

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. 11. 2021

Důvěrnost a dostupnost: veřejně přístupný

Informace o autorském týmu:

Ing. Miloš Val'ko, Ph.D.

doc. Ing. Jakub Kostecký, 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 posledního kvartálu řešení projektu v části, jejímž výsledkem je vytvoření „Metodiky pro vytvoření postupu měření a zpracování pro přesné určení vertikálního gradientu tíhového zrychlení na absolutních tíhových bodech pomocí relativních gravimetrů“.

Metodika pro měření a zpracování pro přesné určení vertikálního gradientu tíhového zrychlení na absolutních tíhových bodech pomocí relativních gravimetrů

1 Úvod

Návrh finální podoby metodiky pro měření a zpracování relativních tíhových měření na absolutních tíhových bodech vychází z podkladů pro tvorbu metodiky postupu měření a zpracování relativních měření uvedených ve (Val'ko a Kostecký 2019), do kterých byly implementovány výsledky a zkušenosti získané v I. a II. etapě měření projektu.

2 Příprava měřických prací

V rámci přípravy měřických prací je potřebné před samotným měřením vykonat kontrolu funkčnosti měřicího přístroje – relativního gravimetru a také kontrolu kompletnosti a funkčnosti příslušenství, které jsou pro měření potřebné.

Kontrola gravimetru zahrnuje:

- 1) Kontrolu variability čtení gravimetru,
- 2) Kontrolu citlivosti a nastavení libel gravimetru,
- 3) Ověření hodnoty a přesnosti kalibračního faktoru gravimetru,
- 4) Kontrolu časové informace přiřazené k měřenému signálu.

ad 1) Při kontrole funkčnosti gravimetru je potřebné ověřit, jestli čtení gravimetru (např. ze zpětné vazby) po zahájení měření konverguje k ustálené hodnotě čtení a jestli variabilita čtení v čase (většinou do několika μGal) odpovídá zvyklostem u konkrétního typu gravimetru při měření na stabilním bodě s nízkým lokálním zdrojem šumu. V případě, že variabilita čtení výrazně překračuje obvyklé hodnoty, je potřebné zjistit nejčastější zdroj nesplnění podmínky kontroly:

- a) lokální zdroj šumu (v takovém případě je vhodné provést měření nejlépe např. v nočních hodinách),
- b) globální zdroj šumu, nejčastěji v důsledku silného nebo blízkého zemětřesení nebo otřesů po zemětřesení (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map/>),
- c) pokud čtení nekonverguje ke stabilnímu čtení, počkat s měřením několik minut z důvodu nepřipravenosti gravimetru na měření,
- d) jde o problém ve správné funkci gravimetru.

ad 2) Při kontrole nastavení libel relativního gravimetru se vykonává test, jestli dochází k maximálnímu čtení při nulové poloze obou libel gravimetru. Postup kontroly a sestavení libel vychází z (Vařko a Kostecký 2019).

U tohoto testu vycházíme z jednoduchého předpokladu, že při správně urovnaném gravimetru naměříme správnou hodnotu Δg a při velmi malém náklonu gravimetru od tížnice o úhel γ hodnotu čtení $\Delta g \cos \gamma$. Výraz $\cos \gamma$ si rozvineme do polynomu druhého stupně a dostaneme $\cos \gamma \approx 1 - \frac{\gamma^2}{2}$ pro $\gamma \ll 1$. Kontrola sestavení libel se tak transformuje v hledání polohy extrému obecné paraboly.

Jako nejrychlejší způsob určení maxima čtení se ale jeví metoda, při které v jednom směru vychýlíme gravimetr o hodnotu x' a odečteme hodnotu čtení. Pak gravimetr vychýlíme o stejný náklon v opačném směru. Pokud je to nutné, úpravou náklonu se snažíme najít takovou polohu vychýlení x'' , při které budeme číst hodnotu stejnou, jaká je hodnota při náklonu x' . Z rozdílu poloh x' a x'' pak zjistíme vrchol paraboly a tedy správnou polohu, při které je gravimetr správně urovnán v daném směru.

Pro polohu x' platí $y(x') = a + b x' + c x'^2$ a pro polohu x'' platí $y(x'') = a + b x'' + c x''^2$. Pokud má platit rovnost $y(x') = y(x'')$, pak mezi koeficienty b a c musí být vztah $b = -c(x' + x'')$. Odtud pro vrchol paraboly dostáváme

$$x_V = -\frac{b}{2c} = \frac{x' + x''}{2}.$$

Zde je nutno podotknout skutečnost, že hodnoty x' a x'' mají opačná znaménka, takže pokud bychom je chtěli charakterizovat jako náklony, pak pro správně urovnaný gravimetr se bude jednat o polovinu rozdílu náklonů v navzájem opačných směrech.

Kontrola citlivosti libel testuje, jaký má dopad změna náklonu gravimetru v určitém směru na hodnotu čtení. Zde se jeví jako žádoucí, aby nebyly tyto citlivosti v obou směrech náklonu vzájemně velmi odlišné, což by mohlo mít negativní dopad na odhad přesnosti výsledků měření.

ad 3) Ověření hodnoty a přesnosti kalibračního koeficientu gravimetru (tj. poměr mezi tíhovým signálem a čtením gravimetru), který by měl být pro přesná tíhová měření za účelem stanovení vertikálních gradientů lepší než 0,3 %. Kalibrační koeficient se zpravidla zjišťuje na základě porovnání měření relativního gravimetru s etalonem. Takovéto měření je možné realizovat třemi způsoby: a) měřením na tíhových bodech s dostatečně přesnými hodnotami tíží s potřebným rozsahem (na gravimetrické základně), b) pomocí souběžného měření tíhových změn (zejména slapových) s kalibrovaným přístrojem (například supravodivý gravimetr nebo jiný přesně kalibrovaný relativní gravimetr), c) měřením vůči známé změně tíhového pole generované přesunem hmot (přístroj v České republice není k dispozici).

ad 4) U kontroly časové informace, tj. času, který je přiřazován hodnotám měřeného tíhového signálu stačí jednoduchá synchronizace s časovou značkou z DCF77 signálu nebo NTP serveru. Přesné přiřazení času k měřeným hodnotám umožňuje přesnější odstranění časově závislých systematických vlivů, které lze modelovat (zejména zemské slapy).

Kontrola kompletnosti a funkčnosti zahrnuje kontrolu všech pomůcek, které jsou nezbytné pro vykonání přesného relativního měření z hlediska jejich technické funkčnosti.

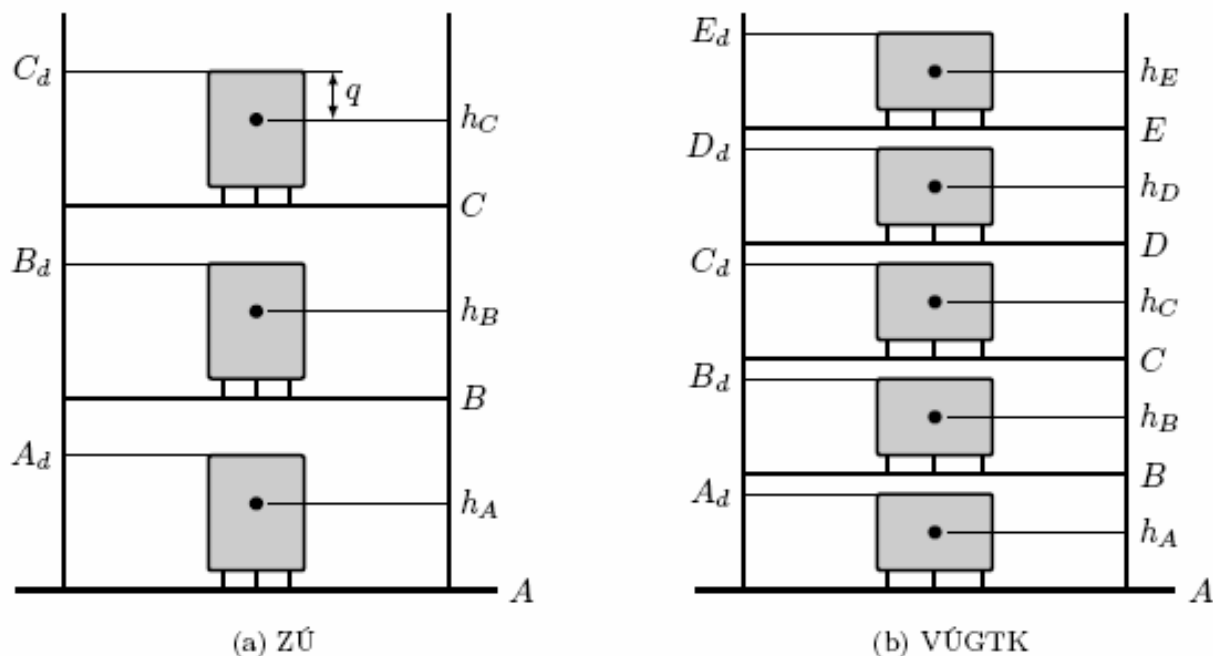
Před měřením se vykoná kontrola nulové polohy libel v obou směrech, která se doporučuje udělat po každém delším transportu gravimetru.

3 Provedení měření

Proces měření, tj. opakované měření relativním gravimetrem na více výškových úrovních nad absolutním bodem, lze vykonat více postupy. Postup ZÚ (obr. 1a) publikovaný v (Pálinkáš a Lederer 2011) je založen na měření ve třech výškových úrovních dvěma relativními gravimetry (tj. až 6 úrovní měřického systému nad bodem). Postup VÚGTK (obr. 1b) je založen na měření na celkem 5 rozdílných výškových úrovních jedním relativním gravimetrem. V případě lineární změny tíhového zrychlení s výškou lze považovat obě z uvedených metodik za ekvivalentní. V případě výrazně nelineární změny tíhového zrychlení s výškou je průběh této změny spolehlivěji popsán pomocí postupu VÚGTK, kdy jsou výškové úrovně rovnoměrněji rozmístěny. Obecným požadavkem na měření by mělo být vykonání alespoň 3 měření na každé ze zvolených výškových úrovní kvůli přesnému popisu chodu gravimetru v procesu měření. Počet měření na každé z výškových úrovní by ale měl být volen s ohledem na přesnost jednotlivého relativního tíhového měření a požadovanou přesnost určení vertikálního gradientu tíhového zrychlení.

Měřené výškové úrovně (dané pozicí senzoru gravimetru) by měly být voleny v rozsahu od měřické značky absolutního tíhového bodu po vrchol pádu existujících absolutních gravimetrů (cca 1,4 m). Pro dosažení přesnosti v určení vertikálního gradientu tíhového zrychlení lepší než 0,5 $\mu\text{Gal/m}$ se doporučuje měření výšek jednotlivých úrovní kalibrovaným měřidlem s přesností lepší než 1,5 mm.

Pro relativní tíhové měření by mělo platit, že počet výškových úrovní pro měření by měl být alespoň o 2 větší, než je očekávaný stupeň polynomu (většinou první stupeň, tj. lineární vztah mezi měřenou hodnotou a výškou) pro popis změny tíhového zrychlení s výškou. Tento požadavek nám umožní ověřit předpoklad o zvoleném stupni polynomu. V případě, že měřením ověřujeme změnu tíhového zrychlení na bodě s nelineárním průběhem, platí doporučení, že výšky jednotlivých úrovní nad bodem by se měly volit s ohledem na umístění extrémů odchylek tíhového zrychlení od lineárního průběhu.



Obr. 1 Postupy způsobu měření při relativních měření při určování vertikálního gradientu tíže.
Obrázek byl převzat z (Pálinkáš a Lederer 2011).

Procesní schéma měření

Relativní na absolutních bodech by se měla realizovat v následujících krocích (obr. 2):

- Před zahájením měřické kampaně stanovit hodnotu kalibračního faktoru a synchronizovat čas v PDA (personal digital assistant) gravimetru. Dále je nutno vykonat kontrolu funkčnosti gravimetru a stavu měřických pomůcek.
- Před měřením na bodě vykonat kontrolu libel.
- V průběhu měření průběžně kontrolovat měřené hodnoty na přítomnost odlehých hodnot.



Obr. 2 Grafické znázornění procesního schématu měření.

4 Zpracování měření

Cílem zpracování měření relativním gravimetrem na více výškových úrovních nad absolutním bodem je aproximace jednak změny tíhového zrychlení s výškou a jednak chodu gravimetru pomocí polynomů vhodných stupňů. Metoda odhadu těchto parametrů je založena na metodě nejmenších čtverců, která předpokládá, že výsledky měření jsou kromě odhadovaného modelu zatížené pouze náhodnými chybami.

Vycházíme z obecně definovaného vztahu pro aproximaci měřených tíhových dat $g(t, h)$ získaných v čase t a výšce měřicího systému h , které zapíšeme pomocí vztahu

$$g(t_i, h_j) = g_0(t_0, 0) + \sum_{k=1}^{n_\alpha} \alpha_k (t_i - t_0)^k + \sum_{l=1}^{n_\gamma} \gamma_l h_{i,j}^l.$$

V uvedeném vztahu veličina $g_0(t_0, 0)$ představuje teoretické čtení na začátku měření ($t = 0$) v nulové výšce nad měřickou značkou, α_k ($k = 1, \dots, n_\alpha$) představují hodnoty parametrů polynomického rozvoje chodu gravimetru do stupně n_α a γ_l ($l = 1, \dots, n_\gamma$) jsou hodnoty parametrů polynomického rozvoje pro popis změny tíhového zrychlení nad měřickou značkou do stupně n_γ . Z praktického hlediska můžeme tento rozvoj v první iteraci ohraničit maximálními hodnotami $n_\alpha = 3$ a $n_\gamma = 3$. Pokud máme spolehlivou informaci o průběhu změny tíhového zrychlení s výškou z předchozího měření na bodě, pro hodnotu parametru n_γ použijeme tuto hodnotu. Na základě dosažených hodnot vektorů α a γ , jejich přesností určení m_α a m_γ se rozhodne o statistické významnosti/nevýznamnosti jednotlivých odhadovaných parametrů a na základě zvolené hladiny spolehlivosti se rozhodne o fixaci hodnot n_α a n_γ pro finální výpočet.

Praktická realizace výpočtu

Předpokládejme soubor n měření relativního tíhového zrychlení v různých časových okamžicích na různých výškových úrovních nad měřickou značkou. V první iteraci si zafixujeme hodnoty $n_\alpha = 3$ a $n_\gamma = 3$.

Matrice plánu A a vektor měření g budou mít tvar

$$A_{(n \times 7)} = \begin{pmatrix} 1 & t_1 - t_0 & (t_1 - t_0)^2 & (t_1 - t_0)^3 & h_{1,j} & h_{1,j}^2 & h_{1,j}^3 \\ 1 & t_2 - t_0 & (t_2 - t_0)^2 & (t_2 - t_0)^3 & h_{2,j} & h_{2,j}^2 & h_{2,j}^3 \\ 1 & t_3 - t_0 & (t_3 - t_0)^2 & (t_3 - t_0)^3 & h_{3,j} & h_{3,j}^2 & h_{3,j}^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & t_n - t_0 & (t_n - t_0)^2 & (t_n - t_0)^3 & h_{n,j} & h_{n,j}^2 & h_{n,j}^3 \end{pmatrix}, \quad g_{(n \times 1)} = \begin{pmatrix} g(t_1, h_j) \\ g(t_2, h_j) \\ g(t_3, h_j) \\ \vdots \\ g(t_n, h_j) \end{pmatrix}$$

Odhad vektoru neznámých parametrů $x_{(7 \times 1)} = (g_0(t_0, 0) \quad \alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \alpha_3 \quad \gamma_1 \quad \gamma_2 \quad \gamma_3)^T$ za předpokladu jednotkové kovarianční matice určíme pomocí vztahu $-x = (A^T A)^{-1} A^T g$. Pro další výpočet je nutné vypočítat vektor reziduí (vektor oprav) pomocí vztahu $r = g - Ax$, který slouží k výpočtu střední jednotkové disperse variance (resp. čtverce střední chyby jednotkové) $m_0^2 = \frac{r^T r}{n-7}$, kde jmenovatel výrazu $n - 7$ charakterizuje počet nadbytečných (redundantních) měření relativního tíhového zrychlení (tj. obecně $n - n_\alpha - n_\gamma - 1$). Tato hodnota m_0^2 normuje odhadovanou kovarianční matici neznámých parametrů C_x vektoru x , tj. $C_x = m_0^2 (A^T A)^{-1}$. V této kovarianční matici C_x , odmocniny diagonálních členů představují hodnoty středních chyb odhadovaných neznámých parametrů. A právě podíl hodnot neznámých parametrů a jejich středních chyb, označován jako t-statistika, představuje míru významnosti, resp. nevýznamnosti daného odhadovaného parametru. Na základě zvolené hladiny významnosti se pak v další iteraci daný odhadovaný parametr použije nebo vyloučí na základě porovnání dosažené hodnoty t-statistiky daného parametru s kritickou hodnotou t-statistiky pro zvolenou hladinu významnosti. V další iteraci nedojde ke změně vektoru g , změna se projeví pouze v matici plánu A , a to ve vyloučení irelevantních sloupců.

Dále by se při výpočtu měla věnovat pozornost vektoru reziduí (oprav), a to zejména vypočtené t-statistice podle vztahu r_i/m_0 . Zde také obecně platí, že překročení vypočtené hodnoty t-statistiky vůči kritické hodnotě t-statistiky pro danou hladinu významnosti zpravidla indikuje odlehlé měření, které je nutno vyloučit ze souboru měření v další iteraci výpočtu.

5 Měřický protokol

Výstupem z měření by měl být kromě určovaných parametrů popisu změny tíhového zrychlení nad absolutním tíhovým bodem (spolu s charakteristikou přesnosti parametrů a celého měření) také měřický protokol s důležitými informacemi o provedeném měření.

Jeho textová část by měla obsahovat zejména tyto informace:

- Název měřického bodu,

- Datum měření,
- Jméno měřiče,
- Použitý gravimetr, případně jeho další charakteristiky a nastavení,
- Naměřené tíhové údaje a zavedené korekce k naměřeným hodnotám,
- Informace o výškových úrovních,
- Odhadnuté parametry spolu s odhadem přesnosti parametrů,
- Informace o přesnosti měření např. pomocí jednotkové střední chyby,
- Vektor reziduí nebo jiné statistické parametry (koeficient šikmosti, špičatosti, ...).

Grafická část měřického protokolu by měla obsahovat minimálně tyto informace:

- Průběh chodu gravimetru během měření,
- Průběh vertikální změny tíhového zrychlení resp. jeho odchylky od lineárního průběhu,
- Vektor reziduí, případně histogram reziduí.

Příloha 1 tohoto dokumentu obsahuje návrh jedné z možných forem měřického protokolu. V příloze 2 je vzorový soubor vstupních dat a v příloze 3 postup zpracování ve formě skriptu pro program MATLAB.

Reference

Pálinkáš V., Lederer M. (2011): Měření vertikálních gradientů tíhového zrychlení na absolutních bodech ČSGS. Geodetický a kartografický obzor, 57 (99), č. 7, s. 149 - 155.

Val'ko M., Kostecký J. (2019): Podklady pro tvorbu metodiky postupu měření a zpracování pro přesné určení vertikálního gradientu tíhového zrychlení na absolutních tíhových bodech pomocí relativních gravimetrů: Příprava měřických prací, výběr absolutních bodů pro relativní měření, zpracování jednoduchého procesního schématu, Výstup 2. etapy projektu TITSCUZK704.

Příloha 1: Návrh formy měřického protokolu

- Textová část

Bod: 62 Jihlava

Datum: 07.04.2020

Casove pasmo: UTC

Meril: MV

Gravimetr: Burris B-20

Vstupni data

=====

Bod	Cas(h,m,s)	g(uGal)	h(mm)
A	12 29 30	90.45	126.9
C	12 33 16	-127.11	892.9
E	12 39 10	-286.50	1452.9
A	12 43 27	91.81	126.9
C	12 46 44	-126.90	892.9
E	12 51 4	-285.80	1453.4
C	12 56 11	-124.85	892.9
E	13 0 28	-286.04	1453.4
A	13 4 12	93.66	126.9
C	13 8 6	-124.87	893.4
E	13 12 15	-285.00	1453.4
A	13 16 19	93.87	127.9
A	13 26 14	93.79	126.9
B	13 30 32	-44.44	613.9
D	13 34 58	-203.20	1173.4
B	13 38 19	-42.81	613.9
D	13 42 36	-203.07	1172.9
A	13 46 32	96.55	126.9
B	13 50 21	-43.07	613.9
D	13 53 39	-201.94	1172.9
B	13 58 5	-42.91	613.9
D	14 2 19	-202.56	1173.4
A	14 8 28	97.38	126.9

Vysledky odhadu

=====

Parametr	Hodnota	Std
Abs. clen	127.34 uGal	0.27 uGal
Chod-lin	3.68 uGal/hod	0.21 uGal/hod
Wzz	-285.38 uGal/m	0.22 uGal/m

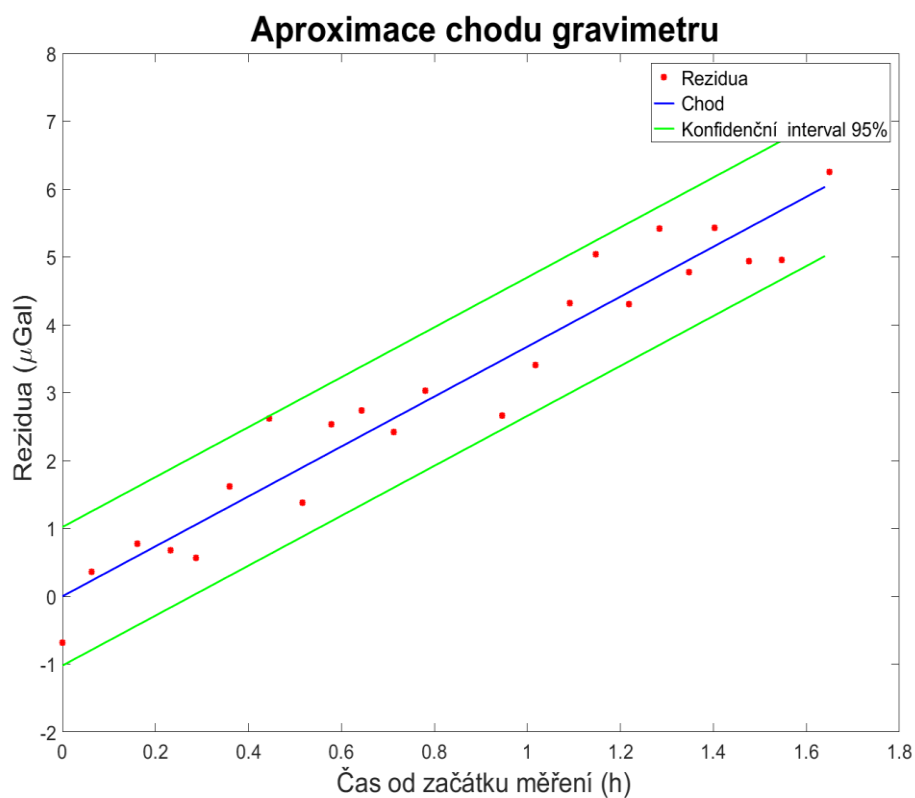
m0= 0.51 uGal

Rezidua

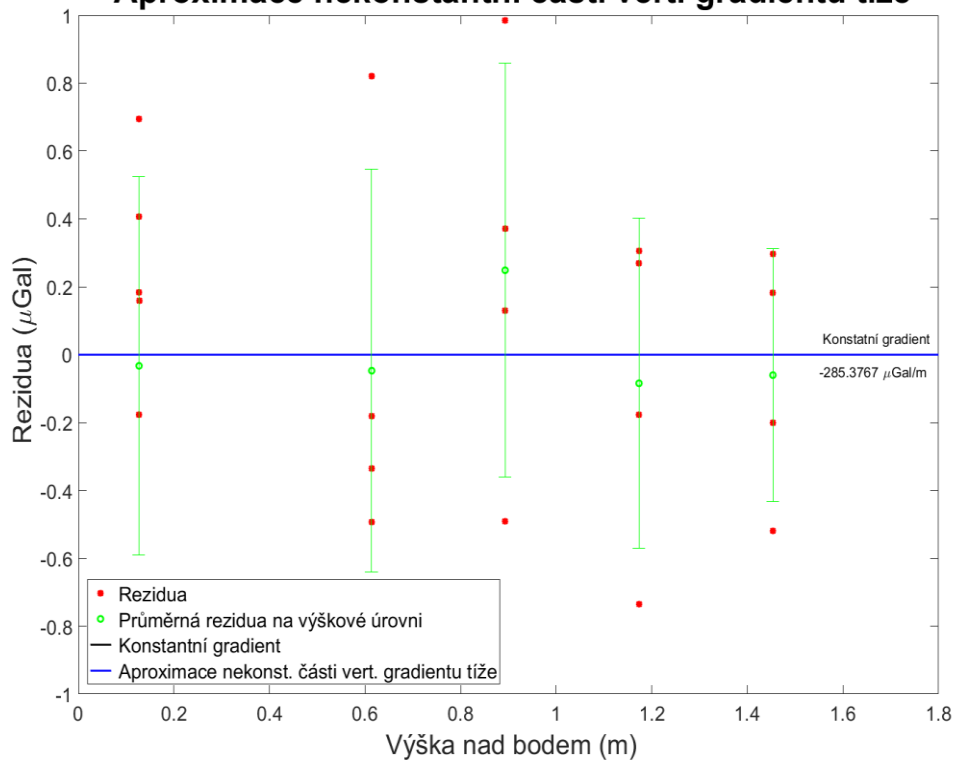
=====

Měření	Bod	r(uGal)	t-stat
1	A	-0.68	-1.34
2	C	0.13	0.25
3	E	0.18	0.36
4	A	-0.18	-0.35
5	C	-0.49	-0.96
6	E	0.30	0.58
7	C	0.99	1.93
8	E	-0.52	-1.02
9	A	0.41	0.80
10	C	0.37	0.73
11	E	-0.20	-0.39
12	A	0.16	0.31
13	A	-0.82	-1.60
14	B	-0.34	-0.66
15	D	0.31	0.60
16	B	0.82	1.61
17	D	-0.18	-0.35
18	A	0.69	1.36
19	B	-0.18	-0.35
20	D	0.27	0.53
21	B	-0.49	-0.97
22	D	-0.74	-1.44
23	A	0.18	0.36

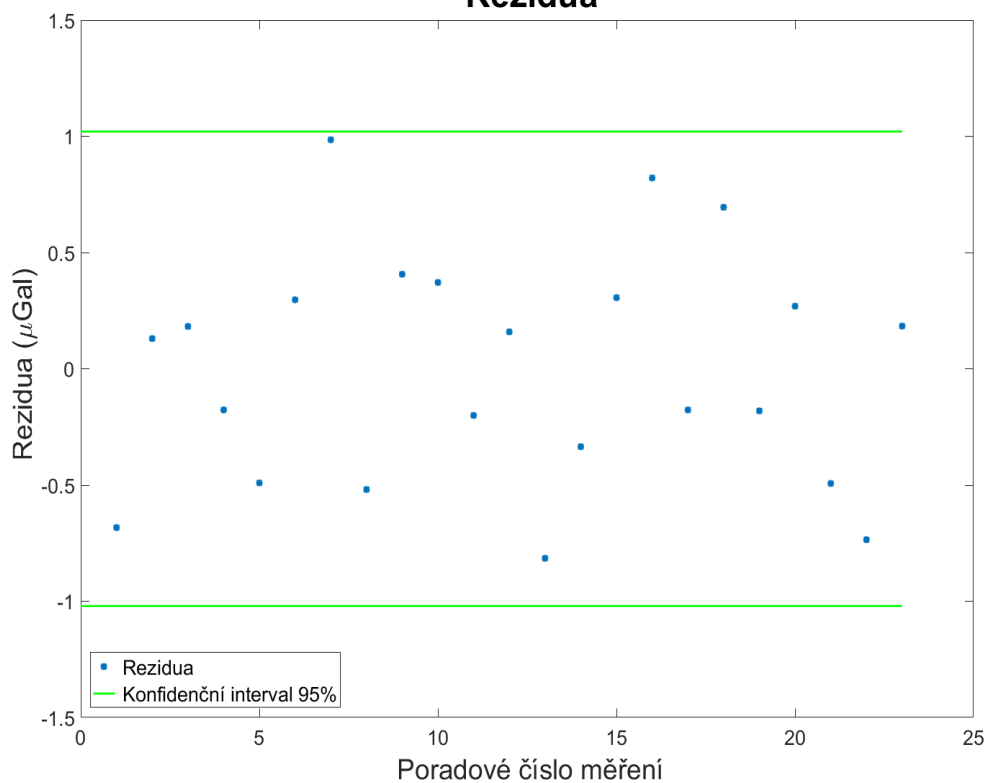
- Grafická část



Aproximace nekonstantní části vert. gradientu tíže



Rezidua



Příloha 2: Vstupní soubory pro výpočet

- soubor grav.dat

```
0 12 29 30    90.4466  126.9
3 12 33 16 -127.1080  892.9
5 12 39 10 -286.5047 1452.9
0 12 43 27    91.8083  126.9
3 12 46 44 -126.9031  892.9
5 12 51 04 -285.8032 1453.4
3 12 56 11 -124.8475  892.9
5 13 00 28 -286.0428 1453.4
0 13 04 12    93.6643  126.9
3 13 08 06 -124.8732  893.4
5 13 12 15 -285.0016 1453.4
0 13 16 19    93.8741  127.9
0 13 26 14    93.7935  126.9
2 13 30 32  -44.4413  613.9
4 13 34 58 -203.1968 1173.4
2 13 38 19  -42.8080  613.9
4 13 42 36 -203.0688 1172.9
0 13 46 32    96.5481  126.9
2 13 50 21  -43.0721  613.9
4 13 53 39 -201.9447 1172.9
2 13 58 05  -42.9100  613.9
4 14 02 19 -202.5606 1173.4
0 14 08 28    97.3821  126.9
```

- soubor site.dat

```
"Jihlava"
"07.04.2020"
"UTC"
"MV"
"Burris B-20"
```

Příloha 3: Zdrojový kód výpočtu v Matlabu

```
% Zpracovani relativneho mereni pro urceni vert. gradientu tize

nch=1;          % stupen polynomu pro aproximaci chodu gravimetru
ngr=1;          % stupen polynomu pro aproximaci vert. gradientu tize
hmax=1.8;       % (m) - maximalni vyska pro zobrazeni gradientu
hred=169.1;     % (mm) - redukce cteni vysky na vysku senzoru

% Nacteni gravimetrickych dat
load 'grav.dat'

% Struktura souboru grav.dat:
% =====
% - bod
% - cas mereni (hod,min,sek)
% - namerena hodnota po odstraneni slapoveho zrychleni (uGal)
% - vyska gravimetru (mm)

bod=grav(:,1);
cas=grav(:,2)+grav(:,3)/60+grav(:,4)/3600;
gr=grav(:,5);
h=grav(:,6);

% Nacteni dat o bodu

% Struktura souboru site.dat
% =====
% - nazev bodu
% - datum mereni
% - casove pasmo
% - jmeno merice
% - nazev použitého gravimetru

sitedata=textread('site.dat','%q',5);

sitedatac=cellstr(sitedata); % convert to string
sdata=char(sitedatac);      % remove quotes
%siten=cellstr(sitename); % convert to string
%sitena=char(siten);        % remove quotes

znaku=size(sdata,2);
bodn=sdata(1,1:znaku);
datum=sdata(2,1:znaku);
```

```
caspasmo=sdata(3,1:znaku);  
meric=sdata(4,1:znaku);  
gravimetr=sdata(5,1:znaku);  
  
% Vypocet  
n=size(grav,1); % pocet mereni  
for i=1:n  
    hb(i)=h(i)/1000;  
end  
  
for i=1:n  
    A0(i,1)=1; % abs. clen  
  
    A1(i,1)=cas(i)-cas(1);  
    if(nch>1)  
        A1(i,2)=(cas(i)-cas(1))^2;  
    end  
    if(nch>2)  
        A1(i,3)=(cas(i)-cas(1))^3;  
    end  
  
    A2(i,1)=hb(i);  
    if(ngr>1)  
        A2(i,2)=hb(i)^2;  
    end  
    if(ngr>2)  
        A2(i,3)=hb(i)^3;  
    end  
end  
  
A=[A0 A1 A2];  
  
x=inv(A'*A)*A'*gr;  
r=gr-A*x;  
m0=r'*r/(n-nch-ngr);  
Cx=m0*inv(A'*A);  
  
for i=1:nch+ngr+1  
    m(i)=sqrt(Cx(i,i));  
end  
  
xlin=inv(A(:,1:nch+2))*A(:,1:nch+2))*A(:,1:nch+2)'\*gr;  
  
% Obrazek chodu gravimetru
```



```
feature('DefaultCharacterSet', 'Windows-1250') %# for all Character
support
figure
casmax=cas(n)-cas(1);
casy=0:0.01:casmax;

for i=1:size(casy,2)
    Achod(i,1)=casy(i);
    if(nch>1)
        Achod(i,2)=casy(i)^2;
    end
    if(nch>2)
        Achod(i,3)=casy(i)^3;
    end
end

modchod=Achod*x(2:nch+1);
modchodl=Achod*x(2:nch+1)-2*sqrt(m0);
modchodu=Achod*x(2:nch+1)+2*sqrt(m0);

chod=gr-A0*x(1)-A2*x(nch+2:nch+ngr+1);
plot(cas-
cas(1),chod,'r*',casy,modchod,'b',casy,modchodl,'g',casy,modchodu,'g','Li
neWidth',2)
title('\fontsize {36} Aproximace chodu gravimetru')
legend('\fontsize {20} Rezidua','\fontsize {20} Chod','\fontsize {20}
Konfidenční. interval 95%')
xlabel('\fontsize {28} Čas od začátku měření (h)')
ylabel('\fontsize {28} Rezidua (\muGal)')
set(gca,'FontSize',20)

% Obrazek prubehu vert. gradientu tize
figure
hd=0:0.01:hmax;
for i=1:n
    Avgrad0(i,1)=1;
    Avgrad0(i,2)=hb(i);
    if(ngr>1)
        Avgrad0(i,3)=hb(i)^2;
    end
    if(ngr>2)
        Avgrad0(i,4)=hb(i)^3;
    end
end
end
```

```
for i=1:size(hd,2)
    Avgrad(i,1)=1;
    Avgrad(i,2)=hd(i);
    if(ngr>1)
        Avgrad(i,3)=hd(i)^2;
    end
    if(ngr>2)
        Avgrad(i,4)=hd(i)^3;
    end
end

vgradv=gr-A0*x(1)-A1*x(2:nch+1)-A2(:,1)*xlin(nch+2);
xgrad=inv(Avgrad0'*Avgrad0)*Avgrad0'*vgradv;

modgrad=Avgrad*xgrad;

modgradm=mean(modgrad);
modgrad=modgrad-modgradm;
vgradv=vgradv-modgradm;

n0=1;
n3=1;
n5=1;
n2=1;
n4=1;

for i=1:n
    if(bod(i)==0)
        r0sum(n0)=vgradv(i);
        hb0sum(n0)=hb(i);
        n0=n0+1;
    end
    if(bod(i)==3)
        r3sum(n3)=vgradv(i);
        hb3sum(n3)=hb(i);
        n3=n3+1;
    end
    if(bod(i)==5)
        r5sum(n5)=vgradv(i);
        hb5sum(n5)=hb(i);
        n5=n5+1;
    end
    if(bod(i)==2)
```

```
    r2sum(n2)=vgradv(i);  
    hb2sum(n2)=hb(i);  
    n2=n2+1;  
end  
if(bod(i)==4)  
    r4sum(n4)=vgradv(i);  
    hb4sum(n4)=hb(i);  
    n4=n4+1;  
end  
end
```

```
r0prum=mean(r0sum);  
r0std=std(r0sum);  
hb0prum=mean(hb0sum);  
r3prum=mean(r3sum);  
r3std=std(r3sum);  
hb3prum=mean(hb3sum);  
r5prum=mean(r5sum);  
r5std=std(r5sum);  
hb5prum=mean(hb5sum);  
r2prum=mean(r2sum);  
r2std=std(r2sum);  
hb2prum=mean(hb2sum);  
r4prum=mean(r4sum);  
r4std=std(r4sum);  
hb4prum=mean(hb4sum);
```

```
rprum=[r0prum r3prum r5prum r2prum r4prum];  
hbprum=[hb0prum hb3prum hb5prum hb2prum hb4prum];  
rstd=[r0std r3std r5std r2std r4std];  
xlingr=[0 hmax];  
ylingr=[0 0];
```

```
plot(hb,vgradv,'r*',hbprum,rprum,'go',xlingr,ylingr,'k',hd,modgrad,'b','L  
ineWidth',2)  
hold on  
errorbar(hbprum,rprum,rstd,'go')  
title('\fontsize {36} Aproximace nekonstantní části vert. gradientu  
tíže')
```

```
legend({'\fontsize {20} Rezidua','\fontsize {20} Průměrná rezidua na  
výškové úrovni','\fontsize {20} Konstantní gradient','\fontsize {20}  
Aproximace nekonst. části vert. gradientu tíže'}, 'Location', 'southwest')  
xlabel('\fontsize {28} Výška nad bodem (m)')  
ylabel('\fontsize {28} Rezidua (\muGal)')  
set(gca, 'FontSize', 20)  
text(1.55, 0.05, '\fontsize {14} Konstatní gradient')  
text(1.55, -0.05, [ '\fontsize {14}' num2str(xlin(nch+2)) '\fontsize {14}  
\muGal/m'])  
  
figure  
xconf=[0 n];  
yconfl=[-2*sqrt(m0) -2*sqrt(m0)];  
yconfu=[2*sqrt(m0) 2*sqrt(m0)];  
tres=1:n;  
plot(tres, r, '*', xconf, yconfl, 'g', xconf, yconfu, 'g', 'LineWidth', 2)  
set(gca, 'FontSize', 20)  
legend({'\fontsize {20} Rezidua','\fontsize {20} Konfidenční interval  
95%'}, 'Location', 'southwest')  
title('\fontsize {36} Rezidua')  
xlabel('\fontsize {28} Poradové číslo měření')  
ylabel('\fontsize {28} Rezidua (\muGal)')  
  
% Vypis  
fileout=fopen('vysledek.txt', 'w')  
  
fprintf(fileout, 'Bod: %s\n', bodn);  
fprintf(fileout, 'Datum: %s\n', datum);  
fprintf(fileout, 'Casove pasmo: %s\n', caspasmo);  
fprintf(fileout, 'Meril: %s\n', meric);  
fprintf(fileout, 'Gravimetr: %s\n', gravimetr);  
  
fprintf(fileout, '\n\nVstupni data\n');  
fprintf(fileout, '=====\n');  
fprintf(fileout, 'Bod Cas(h,m,s) g(uGal) h(mm)\n');  
for j=1:n  
    if(bod(j)==0)  
        bodm=' A';  
    end  
    if(bod(j)==3)  
        bodm=' C';  
    end  
    if(bod(j)==5)  
        bodm=' E';  
    end  
end
```

```
        if(bod(j)==2)
            bodm=' B';
        end
        if(bod(j)==4)
            bodm=' D';
        end

        fprintf(fileout,'%s          %4d          %2d          %2d          %7.2f
%6.1f\n',bodm,grav(j,2),grav(j,3),grav(j,4),gr(j),1000*hb(j));
    end

    fprintf(fileout,'\n\nVysledky odhadu\n');
    fprintf(fileout,'=====\n');
    fprintf(fileout,'Parametr  Hodnota  Std\n');
    for i=1:nch+ngr+1
        if(i==1)
            fprintf(fileout,'Abs. clen %7.2f uGal          %7.2f uGal\n',x(i),m(i));
        end
        if(i==2)
            fprintf(fileout,'Chod-lin          %7.2f          uGal/hod          %7.2f
uGal/hod\n',x(i),m(i));
        end
        if(i==3 && nch==1)
            fprintf(fileout,'Wzz          %7.2f          uGal/m          %7.2f
uGal/m\n',x(i),m(i));
        end
        if(i==3 && nch>1)
            fprintf(fileout,'Chod-kva          %7.2f          uGal/hod^2          %7.2f
uGal/hod^2\n',x(i),m(i));
        end
        if(i==4 && nch==1)
            fprintf(fileout,'Wzzz          %7.2f          uGal/m^2          %7.2f
uGal/m^2\n',x(i),m(i));
        end
        if(i==4 && nch==2)
            fprintf(fileout,'Wzz          %7.2f          uGal/m          %7.2f
uGal/m\n',x(i),m(i));
        end
        if(i==4 && nch>2)
            fprintf(fileout,'Chod-kub          %7.2f          uGal/hod^3          %7.2f
uGal/hod^3\n',x(i),m(i));
        end
        if(i==5 && nch==3)
            fprintf(fileout,'Wzz          %7.2f          uGal/m          %7.2f
uGal/m\n',x(i),m(i));
```

```
end
if(i==5 && nch==2)
    fprintf(fileout,'Wzzz                %7.2f    uGal/m^2                %7.2f
uGal/m^2\n',x(i),m(i));
end
if(i==5 && nch==1)
    fprintf(fileout,'Wzzzz                %7.2f    uGal/m^3                %7.2f
uGal/m^3\n',x(i),m(i));
end
if(i==6 && nch==2)
    fprintf(fileout,'Wzzzz                %7.2f    uGal/m^3                %7.2f
uGal/m^3\n',x(i),m(i));
end
if(i==6 && nch==3)
    fprintf(fileout,'Wzzz                %7.2f    uGal/m^2                %7.2f
uGal/m^2\n',x(i),m(i));
end
if(i==7 && nch==3)
    fprintf(fileout,'Wzzzz                %7.2f    uGal/m^3                %7.2f
uGal/m^3\n',x(i),m(i));
end
end
fprintf(fileout,'\n\nm0= %7.2f uGal\n',sqrt(m0));

fprintf(fileout,'\n\nRezidua\n');
fprintf(fileout,'=====\n');
fprintf(fileout,'Mereni Bod r(uGal) | t-stat\n');
for i=1:n
    if(bod(i)==0)
        bodm=' A';
    end
    if(bod(i)==3)
        bodm=' C';
    end
    if(bod(i)==5)
        bodm=' E';
    end
    if(bod(i)==2)
        bodm=' B';
    end
    if(bod(i)==4)
        bodm=' D';
    end
end
```

```
tstat=r(i)/sqrt(m0);  
  
if(abs(tstat)>2)  
    fprintf(fileout,'%6d %s %7.2f | %7.2f *\n',i,bodm,r(i),tstat);  
else  
    fprintf(fileout,'%6d %s %7.2f | %7.2f\n',i,bodm,r(i),tstat);  
end  
end  
  
fclose(fileout)
```

[poslední strana]

