

Západočeská univerzita v Plzni

Fakulta aplikovaných věd

Katedra matematiky

## **Bakalářská práce**

# **Metody gravimetrie a zpracování tíhových dat**

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem práci vypracovala samostatně pod odborným vedením vedoucího bakalářské práce a uvedla jsem veškeré použité prameny a literaturu.

V Plzni dne 5. 6. 2013

.....

*podpis*

## **Poděkování**

Na tomto místě bych ráda poděkovala vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Pavlu Novákovi, Ph.D. za odborné vedení práce, věcné připomínky, nápady a hlavně za trpělivost.

## **Abstrakt**

Tato práce je věnována gravimetrii, experimentální disciplíně geodézie a geofyziky. V úvodu práce jsou popsány základní metody mapování zemského gravitačního pole včetně metody gradiometrie. V další části se práce věnuje pouze pozemní gravimetrii, díky které získáváme nejpresnější data o zemském poli. Pro pozemní gravimetrii je zpracován teoretický základ a přístrojové vybavení zaměřené na gravimetry, které se nachází v České republice. Jedna z posledních kapitol je věnována Geodetické observatoři Pecný v Ondřejově u Prahy, která je určena k experimentálnímu výzkumu v oblasti gravimetrie. V závěru práce je ukázka příkladu zpracování gravimetrického měření relativním pružinovým gravimetrem Burris.

## **Klíčová slova:**

Gradiometrie, gravimetr, gravimetrie, zemské tíhové pole

## **Abstract**

This report is dedicated to gravimetry, an experimental discipline of geodesy and geophysics. At the beginning the basic methods of mapping the Earth's gravitational field, including the method of radiometry, are described. In the remaining part of the text only terrestrial gravimetry, thanks to which we obtain the most accurate gravity data, is discussed. Theory of the gravitational field as applied in geodesy and instrumentation aimed at gravimeters located in the Czech Republic are described. One of the last chapters is devoted to the Geodetic Observatory Pecný at Ondřejov near Prague, which is intended for experimental research in the field of gravimetry. An example of processing gravimetric measurements with relative gravimeter Burris concludes the text.

## **Key words:**

Earth's gravity field, gradiometry, gravimeter, gravimetry

## Obsah

SEZNAM ZKRATEK A POUŽITÉHO OZNAČENÍ.....	3
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	4
1 FUNKCE A VÝZNAM GRAVIMETRIE .....	5
2 ZÁKLAD TEORIE TÍHOVÉHO POLE ZEMĚ .....	7
3 MAPOVÁNÍ TÍHOVÉHO POLE ZEMĚ .....	11
3.1 Gravimetrie .....	11
3.1.1 Pozemní gravimetrie .....	11
3.1.2 Letecká gravimetrie .....	12
3.1.3 Družicová gravimetrie .....	12
3.2 Gradiometrie (gradientometrie) .....	13
4 POZEMNÍ GRAVIMETRIE .....	17
4.1 Teoretický základ .....	17
4.1.1 Kyvadla .....	17
4.1.2 Volný pád.....	18
4.1.3 Pružinový gravimetr .....	20
4.1.4 Supravodivý gravimetr .....	21
4.2 Přístrojové vybavení.....	22
4.2.1 Kyvadlo.....	22
4.2.2 Mechanické relativní gravimetry .....	22
4.2.3 Absolutní balistické gravimetry .....	25
4.2.4 Supravodivé gravimetry.....	29
5 GRAVIMETRIE V ČESKÉ REPUBLICE.....	31
5.1 Gravimetrické základy České republiky .....	31
5.2 Gravimetrie na Geodetické observatoři Pecný.....	33
5.2.1 Gravimetrická laboratoř na GO Pecný.....	33

5.2.2	Přístrojové vybavení na GO Pecný.....	34
5.3	Probíhající práce v oblasti české gravimetrie.....	37
6	PŘÍKLAD ZPRACOVÁNÍ GRAVIMETRICKÉHO MĚŘENÍ .....	38
7	ZÁVĚR .....	41
	SEZNAM PŘÍLOH.....	44

## SEZNAM ZKRATEK A POUŽITÉHO OZNAČENÍ

$g$  ... tíhové zrychlení (intenzita tíhového pole Země)

$G$  ... Newtonova gravitační konstanta

$\omega$  ... úhlová rychlost Země

$\rho$  ... měrná hmotnost

$\nabla$  ... gradient

$V_a$  ... potenciál odstředivé síly

$V_g$  ... gravitační potenciál

$W$  ... potenciál tíhového pole Země

$F_g$  ... gravitační síla

$m$  ... hmotnost

$\mathbf{x}$  ... polohový vektor

## SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obrázek 2. 1** – Působení gravitační síly v bodě  $x$  vyvolané elementem  $dB$  ( $x'$ )
- Obrázek 3. 1** – Družice GOCE
- Obrázek 3. 2** – Gradiometr na palubě družice GOCE
- Obrázek 3. 3** – Globální model geoidu z dat družice GOCE
- Obrázek 4. 1** – Reverzní kyvadlo
- Obrázek 4. 2** – Matematické kyvadlo
- Obrázek 4. 3** – Princip metody měření tíže pomocí volného pádu
- Obrázek 4. 4** – Translační pohyb pružiny při zatížení hmotností  $m$
- Obrázek 4. 5** – Schéma gravimetru LaCoste and Romberg
- Obrázek 4. 6** – Gravimetr ZLS BURRIS
- Obrázek 4. 7** – Schéma balistického gravimetru FG5
- Obrázek 5. 1** – Základní geodynamická síť České republiky
- Obrázek 5. 2** – Absolutní gravimetr FG5 č. 215
- Obrázek 5. 3** – Supravodivý gravimetr OSG – 050
- Obrázek 5. 4** – Záznam tíhových změn gravimetrem OSG – 050 na stanici GO Pecný
- Obrázek 6. 1** – Schéma měření



# 1 FUNKCE A VÝZNAM GRAVIMETRIE

Tato práce se věnuje využití gravimetrie v geodézii. Gravimetrie je experimentální disciplína geodézie a geofyziky. Její název vznikl spojením latinských slov *gravis* (= těžký) a *metres* (= měřit), což v překladu znamená měření tíže.

V **geodézii** využíváme gravimetrii především pro určení přesného tvaru Země, realizaci a údržbu referenčních souřadných systémů. Opakovaným měřením tíže též můžeme detekovat pohyby povrchu Země. Získaná tíhová data nám také umožňují určit průběh hladinových ploch včetně geoidu, jež odpovídá střední hladině ideálního světového oceánu.

**Geofyzika** pomocí gravimetrických dat studuje především vnitřní strukturu Země. Na základě těchto dat se snaží určit rozložení a hodnoty měrné hmotnosti jednotlivých částí zemského tělesa. Například z hodnoty tíhového zrychlení vyplývá, že průměrná měrná hmotnost Země dosahuje  $5,52 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$  (Šůla, 2006), což je dvakrát větší hodnota než měrná hmotnost hornin ve svrchní části zemské kůry. Měrná hmotnost v zemském jádru je pak ještě vyšší – cca  $15 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$  (Šůla, 2006). Studováním periodických i neperiodických časových variací tíhového zrychlení je možno odvodit důležité informace o dynamice zemského tělesa.

Pomocí tíhových dat se nezkoumá jen vnitřní struktura Země, ale i časově závislé jevy na jejím povrchu. Například obor **hydrologie** se pomocí gravimetrie zabývá zkoumáním podzemních vod a studiem koloběhu vody v přírodě. Gravimetrie umožňuje vymezit tektonické zóny v sedimentárních pánvích, na které jsou vázány vodní zdroje. **Glaciologie**, která se zabývá změnami zalednění, využívá tíhová data pro studium dynamiky ledovců a jejich působení na klimatické podmínky. V **oceánografii** se gravimetrická data využívají ke studiu změn hladiny vodního obalu Země.

Gravimetrie je také důležitým zdrojem dat pro různé aplikované obory **geologie**. Pomocí gravimetrických dat je možné nalézt větší geologická tělesa různých geometrických tvarů. Velmi přesný a detailní gravimetrický průzkum umožňuje vyhledat rudná ložiska v jakémkoliv hloubce. Dále lze identifikovat sedimentární pánve, ve kterých se mohou vyskytovat ložiska ropy a zemního plynu. Kromě objevování ložisek nerostných surovin se gravimetrie podílí na šetření zlomů v zájmové geologické

oblasti a na sestavování strukturně – tektonických schémat pro metalogenetické<sup>1</sup> studie. **Inženýrská geologie** zase využívá gravimetrii pro vymezení tektonicky porušených a zvětraných hornin.

Na závěr nesmíme opomenout využití tíhových dat ve **speleologii** (průzkum jeskyní) a **archeologii**, kde se geofyzikální prospekce stala nepostradatelným doplňkem terénního archeologického výzkumu. Díky metodám gravimetrie mohou archeologové lokalizovat nezaplněné nebo vytěžené prostory, kterými jsou hrobky, sklepy, dutiny a krypty.

V následující kapitole je stručně diskutována teorie tíhového pole Země včetně základních vztahů a parametrů. V třetí části textu jsou popsány základní metody mapování zemského tíhového pole včetně metody gradiometrie. Další části textu se věnují metodám a přístrojům pozemní gravimetrie, která je nejběžnější metodou mapování tíhového pole v České republice. V závěru práce jsou diskutovány gravimetrické základy České republiky, gravimetrie na Geodetické observatoři Pecný a současné gravimetrické práce v České republice. V poslední kapitole je uveden příklad zpracování měřených gravimetrických dat.

---

<sup>1</sup> Nauka o vzniku rudných ložisek v čase a prostoru (ve spojení s průběhem geologického rozvoje jednotlivých oblastí kůry s přihlédnutím ke všem geologickým činitelům).

## 2 ZÁKLAD TEORIE TÍHOVÉHO POLE ZEMĚ

Využití gravimetrických údajů v geodézii je založeno na Newtonově gravitačním zákonu, který Isaac Newton popsal ve své práci *Philosophiae naturalis principia* v roce 1687. Zákon vyjadřuje gravitační sílu mezi dvěma body  $\mathbf{x}_1$  a  $\mathbf{x}_2$  o hmotnostech  $m_1$  a  $m_2$  jako (Vykuřil, 1982)

$$\mathbf{F}_g(\mathbf{x}_1) = G \frac{m_1 m_2}{|\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2|^3} (\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2) = -\mathbf{F}_g(\mathbf{x}_2), \quad (2-1)$$

kde  $G$  je Newtonova gravitační konstanta ( $G = 6,6742 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ ). V rovnici (2-1) i dále v textu jsou všechny vektory a matice označeny tučně.

Tímto zákonem ale Isaac Newton pouze popsal teorii, která umožňuje kvantifikovat gravitační účinek. Zákon má řadu nedostatků (nekonečná rychlost interakce, problém definice síly, nerelativističnost, vnitřní nekonzistence), které fyzika stále nedokáže uspokojivě vysvětlit. Toto platí i pro zobecnění Newtonova gravitačního zákona, které odvodil ve své teorii relativity německý fyzik Albert Einstein.

Gravitace je považována za jednu ze čtyř základních fundamentálních sil<sup>2</sup> fyziky, které umožňují popsat vzájemné silové působení částic a pole. Z těchto sil je gravitace nejslabší. Pro analýzu fundamentálních sil je vhodná koncepce pole (v našem případě gravitační pole), kde každému bodu prostoru přisoudíme konkrétní hodnotu některého z parametrů, které umožní popsat gravitační pole.

Gravitační pole je ve 3 rozměrném prostoru vektorové pole, kde základním parametrem je vektor intenzity gravitačního pole, čili gravitační zrychlení  $\mathbf{g}_g$ . Toto zrychlení vyjadřuje gravitační sílu, kterou generuje bodové těleso o jednotkové hmotnosti.

V případě zkoumání gravitačního pole Země je nutné planetu rozdělit na malé diferenciální části, jejichž gravitační účinek vyjádříme podle zobecněného Newtonova zákona jako integrální součet gravitačních účinků diferenciálně malých částí

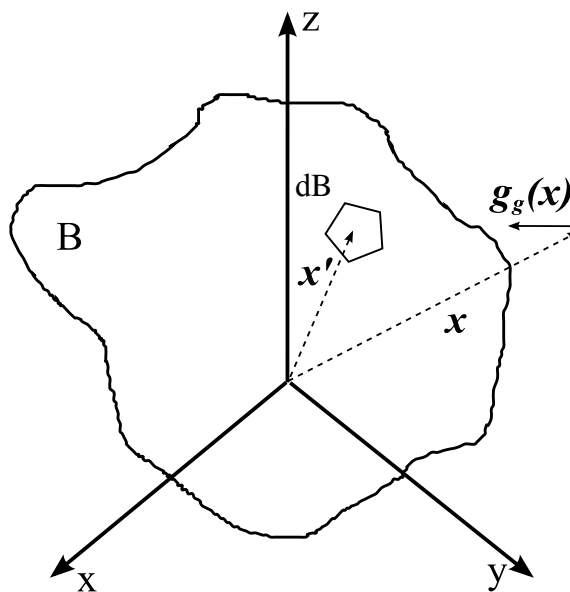
$$\mathbf{g}_g(\mathbf{x}) = G \iiint_B \frac{\rho(\mathbf{x}')}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|^3} (\mathbf{x} - \mathbf{x}') d\mathbf{B}(\mathbf{x}'), \quad (2-2)$$

---

<sup>2</sup> Gravitace, elektromagnetické pole, slabá interakce (slabá jaderná síla) a silná interakce (silná jaderná síla).

kde  $\rho$  je funkce rozložení měrné hmotnosti jednotlivých diferenciálních částí a  $\rho(\mathbf{x}') \in B$ .

Na obrázku 2. 1 definujeme kartézskou soustavu souřadnic, kde jsou souřadné osy navzájem kolmé a protínají se v jednom bodě, kterým je počátek soustavy souřadnic. V geodézii se standardně používá geocentrický souřadnicový systém s počátkem ve hmotném středu (těžišti) Země, osou  $z$  směřující do střední polohy rotační osy Země a osou  $x$  ležící na průsečíku zemského rovníku a nultého (Greenwichského) poledníku. Souřadný systém je pravotočivý. V tomto souřadnicovém systému definujeme polohu bodu pomocí vektoru  $\mathbf{x} = (x \ y \ z)$ .



Obrázek 2. 1 - Působení gravitační síly v bodě  $\mathbf{x}$  vyvolané elementem  $dB(\mathbf{x}')$

Základní vlastnosti zemského gravitačního pole (Novák [online], 2006) jsou:

- Konzervativnost gravitačního pole

$$\oint \mathbf{g}_g(\mathbf{x}) \cdot d\mathbf{z}(\mathbf{x}) = 0, \quad (2-3)$$

kde  $\mathbf{z}$  je dráha.

- Nevírovost (= netočivost) gravitačního pole

$$\nabla \times \mathbf{g}_g(\mathbf{x}) = \mathbf{o}. \quad (2-4)$$

Tyto vlastnosti umožňují zemské vektorové gravitační pole reprezentovat skalárním (potenciálním) polem. To nám umožňuje zavést veličinu gravitační potenciál.

Gravitační potenciál označíme  $V_g$  a vztah mezi ním a gravitačním zrychlením je dán diferenciální rovnicí

$$\mathbf{g}_g(\mathbf{x}) = \nabla V_g(\mathbf{x}). \quad (2 - 5)$$

Pokud zkoumáme silové působení na povrchu Země, je důležité kromě gravitační síly  $\mathbf{F}_g$  uvažovat i sílu odstředivou  $\mathbf{F}_a$ , která je způsobena rotací Země. Odstředivá síla je tzv. nepravá síla (tj. síla, která nepatří mezi základní fundamentální síly). Základní vlastností nepravé síly je to, že je to síla vznikající zrychlením souřadné soustavy (např. její rotací).

V libovolném bodě  $\mathbf{x}$  na povrchu Země rotující rychlostí  $\omega = 7,292115 \times 10^{-5} \text{ rad s}^{-2}$  (Novák [online], 2006) určíme odstředivé zrychlení jako

$$\mathbf{g}_a(\mathbf{x}) = \omega^2 \mathbf{p}, \quad (2 - 6)$$

kde  $\mathbf{p}$  je vektor k bodu  $\mathbf{x}$  kolmý na rotační osu.

I v tomto případě definujeme potenciál odstředivé síly jako

$$\mathbf{g}_a(\mathbf{x}) = \nabla V_a(\mathbf{x}). \quad (2 - 7)$$

Geodézie se zabývá studiem tvaru Země, který je výsledkem působení tíže. Tíhové zrychlení  $\mathbf{g}$  získáme jako součet vektoru gravitačního zrychlení  $\mathbf{g}_g$  a vektoru odstředivého zrychlení  $\mathbf{g}_a$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{g}_g(\mathbf{x}) + \mathbf{g}_a(\mathbf{x}). \quad (2 - 8)$$

Díky linearitě operátoru gradient ( $\nabla$ ) lze tíhový potenciál  $W$  vyjádřit jako součet gravitačního potenciálu  $V_g$  a potenciálu odstředivé síly  $V_a$

$$W(\mathbf{x}) = V_g(\mathbf{x}) + V_a(\mathbf{x}). \quad (2 - 9)$$

Tíhový potenciál  $W$  má přímý vztah ke tvaru Země, neboť tekutiny (např. mořská voda) se urovňávají do tvaru hladinové plochy, čili plochy konstantního tíhového potenciálu ( $W = \text{konst.}$ ). Hladinovou plochu zemského tíhového pole s potenciálem  $W_0$  aproximující střední hladinu ideálních zemských oceánů nazýváme geoid. Koncept geoidu navrhl na počátku 19. století německý matematik C. F. Gauss.

Jedním z úkolů geodézie je zmapovat a popsat tíhové pole Země ve smyslu globálního modelu tíhového potenciálu. Tíhový potenciál je ale neměřitelný parametr. Měřitelné je ale tíhové zrychlení  $\mathbf{g}$  a díky platnosti vztahu

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = -\nabla W(\mathbf{x}) \quad (2 - 10)$$

dokážeme tíhový potenciál  $W$  určit (tzv. úlohy teorie potenciálu).

Jednotkou hodnoty tíhového zrychlení, podle mezinárodního systému jednotek (SI), je  $\text{m s}^{-2}$ . V geodézii a geofyzice se často používá odvozená jednotka Gal podle slavného renesančního vědce Galilea Galileiho.

$$1 \text{ Gal} = 10^{-2} \text{ m s}^{-2},$$

často se také používá miliGal, případně mikroGal,

$$1 \text{ mGal} = 10^{-3} \text{ Gal} = 10^{-5} \text{ m s}^{-2}$$

$$1 \text{ } \mu\text{Gal} = 10^{-6} \text{ Gal} = 10^{-8} \text{ m s}^{-2}.$$

Nověji je pro mapování tíhového pole Země používána gradiometrie, která umožňuje měření hodnot gradientů tíhového zrychlení

$$\nabla \times \nabla W(\mathbf{x}) = -\nabla \times \mathbf{g}(\mathbf{x}), \quad (2 - 11)$$

které mají rozměr (SI)  $\text{s}^{-2}$ .

## 3 MAPOVÁNÍ TÍHOVÉHO POLE ZEMĚ

### 3.1 Gravimetrie

Měřením hodnot tíhového zrychlení se zabývá gravimetrie.

Metody gravimetrie lze dělit podle měřených hodnot na:

- **Relativní** - zabývá se měřením změn vektoru tíhového zrychlení  $\mathbf{g}$  v čase či prostoru,
- **Absolutní** - absolutní gravimetrie měří velikost vektoru tíhového zrychlení  $\mathbf{g}$ .

Podle způsobu umístění gravimetru při měření dělíme gravimetrii na:

- **Statickou**
  - Pozemní
- **Kinematickou**
  - Námořní
  - Letecká
  - Družicová.

Gravimetrii také dělíme podle charakteru měřené veličiny:

- **Skalární** – určuje jen velikost vektoru tíže  $g$ , resp. jednu ze složek vektoru  $\mathbf{g}$ .
- **Vektorová** – měří všechny 3 složky tíhového vektoru  $\mathbf{g}$ .

#### 3.1.1 Pozemní gravimetrie

Pozemní gravimetrie je experimentální disciplína zaměřená na měření velikosti vektoru tíhového zrychlení  $g(\mathbf{x}, t) = |\mathbf{g}(\mathbf{x}, t)|$ , kde symbol  $t$  reprezentuje čas (epochu) měření. Relativní přesnost pozemní gravimetrie dosahuje  $10^{-9}$  (1 ppb), což činí tíhové hodnoty nejpřesnějšími geodetickými daty. Vysoká přesnost dat je zaručena pouze při měření na pevné zemi.

Měření na pevné zemi je ale omezeno přístupností terénu. Například v poušti či pralese je prakticky nemožné gravimetrie měřit. Dále víme, že planeta Země je pouze z 1/3 pokryta souší, tudíž není možné získat pozemní gravimetrická tíhová data globálního charakteru.

Dalším problémem pozemní gravimetrie může být rozdílná politická situace ve světě a s ní spojené politické hranice zabraňující gravimetrickému měření, či dostupnosti gravimetrických dat.

Do pozemní gravimetrie patří i metody měření v podzemí (tj. v dolech a vrtech), pod hladinou moří (tj. v ponorkách) a na moři, kde jsou používány speciální námořní gravimetry (Cimbálník, Zeman a Kostecký, 2008).

### **3.1.2 Letecká gravimetrie**

Částečné odstranění některých problémů pozemní gravimetrie umožňuje letecká gravimetrie. Měření je prováděno v letadle, v menší míře vrtulníku či vzducholodi, za pomoci speciálních gravimetrů. Jelikož letadlo není spojeno se zemským povrchem, měří se pouze vektor gravitačního zrychlení (či jeho jedna složka). Toto gravitační zrychlení je potřeba oddělit od kinematického zrychlení, které je dané nerovnoměrným pohybem letadla.

Výhodou letecké gravimetrie je rychlé pokrytí rozsáhlejších oblastí. Měřená oblast je pokryta pravidelnými trajektoriemi letu (poloha gravimetru je určena za pomoci GNSS<sup>3</sup>), díky kterým se měření provádí. Při letecké gravimetrii se nemusí řešit otázka přístupnosti terénu a problematika měření např. vodních ploch, močálů, hor a pouští.

Nevýhodou letecké gravimetrie je vyšší hodnota měřického šumu, který je způsoben nerovnoměrným pohybem letadla. Proto je nutné naměřený signál filtrovat za účelem odstranění šumu. Důsledkem filtrace jsou frekvenčně omezená data. Přesnost dat letecké gravimetrie dosahuje 1 – 2 mGal pro prostorové rozlišení 10 km (Alberts, 2009).

### **3.1.3 Družicová gravimetrie**

Družicová gravimetrie poskytuje data s téměř globálním pokrytím, kromě oblastí zemských pólů (díky sklonu dráhy družice). Díky výšce družice (200 – 500 km nad zemí) lze sestavit pouze dlouhovlnný globální model tíhového pole Země, protože tyto výšky s sebou nesou výrazně slabší gravitační signál, než jaký můžeme naměřit při pozemní a letecké gravimetrii. Z tohoto důvodu lze rekonstruovat pouze nízkofrekvenční (dlouhovlnné) složky tíhových dat (prostorové rozlišení cca 100 km). Data družicové gravimetrie ale lze doplnit o vysokofrekvenční (krátkovlnnou) složku, která je dostupná z lokálních dat pozemní nebo letecké gravimetrie.

---

<sup>3</sup> Globální navigační družicový systém.



Družicová gravimetrie neřeší žádná omezení daná nepřístupným terénem, vodními plochami nebo politickou situací jednotlivých států.

V červenci roku 2000 byla na oběžnou dráhu vypuštěna první gravimetrická družice CHAMP (**CH**allenging **MI**nisatellite **P**ayload for geophysical research and application). Jedná se o německou družicovou misi realizovanou GFZ (GeoForschungsZentrum), což je německé národní výzkumné centrum pro geovědy. Tato družice měla za úkol globálně mapovat gravitační a magnetické pole Země. Díky této misi družice naměřila data, která umožnila odvození globálního modelu gravitačního a magnetického pole Země (Klokočník, 2009).

O dva roky později vypustil americký Národní výbor pro výzkum vesmíru a meziplanetární lety (NASA) na oběžnou dráhu dvojici téměř identických družic mise GRACE. Družice navazují na misi CHAMP, jejichž zvýšená přesnost je docílena použitím dvou satelitů. Družice jsou od sebe udržovány ve vzdálenosti cca 220 km. Dvojice družic mise GRACE umožňuje velmi přesné měření změn vzdálenosti obou družic, které je možno mapovat na parametry gravitačního pole Země. Právě díky nim byla poprvé s velkou přesností zjištěna velikost tajících ledovců. Družice GRACE jednou za 30 dní poskytují data k sestavení globální mapy gravitačního pole Země. Tyto pravidelné přehledy změn gravitačního pole nám dokazují neustálý přesun velkého objemu vody, který má následně vliv na klimatické podmínky naší planety (Klokočník, 2009).

### 3.2 Gradiometrie (gradientometrie)

Gradiometrii můžeme považovat za rozšířením gravimetrie. Předmětem měření gradiometrie je měření gradientů, čili prostorových změn tíhového respektive gravitačního zrychlení. Gradiometrický tenzor (Novák [online], 2006) lze zapsat

$$\nabla \times \nabla W(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 W(\mathbf{x})}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 W(\mathbf{x})}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 W(\mathbf{x})}{\partial x \partial z} \\ \frac{\partial^2 W(\mathbf{x})}{\partial y \partial x} & \frac{\partial^2 W(\mathbf{x})}{\partial y^2} & \frac{\partial^2 W(\mathbf{x})}{\partial y \partial z} \\ \frac{\partial^2 W(\mathbf{x})}{\partial z \partial x} & \frac{\partial^2 W(\mathbf{x})}{\partial z \partial y} & \frac{\partial^2 W(\mathbf{x})}{\partial z^2} \end{bmatrix}. \quad (3-1)$$

Jednotkou gradientů tíhového zrychlení podle mezinárodního systému jednotek (SI) je  $s^{-2}$ . V geodézii a geofyzice se často používá odvozená jednotka Eötvös (E)

podle maďarského fyzika L. Eötvöse. Důvodem je velká hodnota  $s^{-2}$  v případě měření gradientů tíže v zemském tíhovém poli. Platí vztah

$$1E = 10^{-9} s^{-2}.$$

Gradiometrie byla původně pouze **pozemní** – měření torzními vahami. Průkopníkem pozemní gradiometrie byl maďarský fyzik L. Eötvös. Výhodou i nevýhodou gradiometrie je vysoká citlivost přístrojů při měření. Na jednu stranu získáme velmi přesná data, ale na druhou stranu je měření díky vysoké citlivosti přístrojů značně problematické. Nově můžeme používat i měření z **letecké gradiometrie**, která opět nemusí při měření řešit problematiku přístupnosti terénu, či politickou situaci jednotlivých států.

Nejnovějším způsobem měření gradientů gravitačního zrychlení je metoda **družicová gradiometrie**. V březnu roku 2009 byla na oběžnou dráhu vyslána Evropskou kosmickou agenturou (ESA) družice GOCE, **G**ravity field and steady – state **O**cean **C**irculation **E**xplorer (Klokočník, 2009). Unikátní vlastností družice je její schopnost udržet se ve výšce cca 250 km nad zemí. V této výšce je družice brzděna vrchní vrstvou zemské atmosféry. Proto byl navržen velmi pečlivě její aerodynamický tvar snižující čelní odpor (obrázek 3. 1). Navíc je družice vybavena iontovým motorem, který překonává odpor atmosféry.



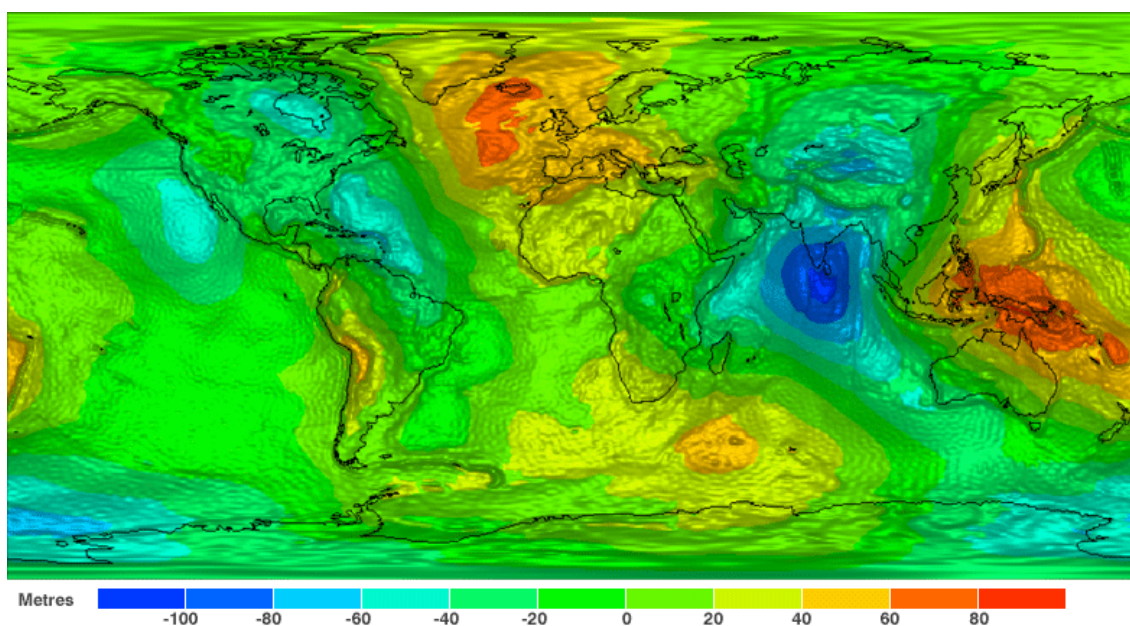
Obrázek 3. 1 – Družice GOCE (Zdroj: <http://www.esa.int>)

Nejdůležitější částí družice GOCE je elektrostatický gradiometr (obrázek 3. 2), který se skládá ze šesti akcelerometrů<sup>4</sup> umístěných na koncích půlmetrových ramen (ramena jsou na sebe navzájem kolmá). Gradienty gravitačního zrychlení jsou odvozeny kombinací dat jednotlivých akcelerometrů (ESA [online], 2013).



Obrázek 3. 2 – Gradiometr na palubě družice GOCE (Zdroj: <http://www.esa.int>)

Díky udržování družice v blízkosti Země, kde je gravitační pole silnější než ve větších výškách, mapuje GOCE velmi přesné odchylky v gravitačním poli s extrémními detaily. Tyto výsledky pak vytvářejí unikátní globální model geoidu, viz obrázek 3. 3.



Obrázek 3. 3 – Globální model geoidu z dat družice GOCE (Zdroj: <http://www.esa.int>)

<sup>4</sup> Akcelerometr je přístroj k měření zrychlení přímočarého pohybu.

Gradiometrií se lze podrobněji zabývat, ale jelikož není hlavním tématem této práce, není zde dále diskutována. V této práci se budeme dále zabývat pouze gravimetrií pozemní (tj. gravimetrie statická skalární).

## 4 POZEMNÍ GRAVIMETRIE

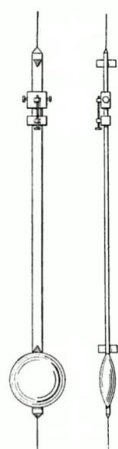
### 4.1 Teoretický základ

Základy gravimetrie jsou závislé na konkrétním typu gravimetru. Zde se zaměříme pouze na ty základní.

#### 4.1.1 Kyvadla

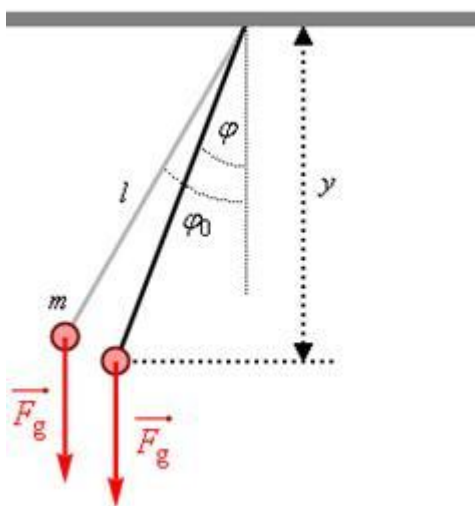
Kyvadlo je jedním ze základních principů absolutní i relativní gravimetrie. Významným vědcem v historii kyvadla byl holandský fyzik Christian Huygens (1629 – 1695), který popsal teorii matematického a fyzikálního kyvadla. V roce 1657 sestrojil Huygens první kyvadlové hodiny. Tím byl položen základ pro konstrukci kyvadlových přístrojů, které sloužily k měření tíhového zrychlení. Kyvadlové přístroje se používaly k měření tíhového zrychlení více jak 250 let.

Většina kyvadel pro měření tíže byla konstruována v 19. století. Roku 1811 byl popsán princip reverzního kyvadla, které bylo až po sedmi letech poprvé sestaveno Henrym Katerem. Kyvadlo bylo vyrobeno z mosazné tyče s oboustranně upevněnými noži ve vzdálenosti 1 m (jejich hrany představují osy otáčení). Dále se skládalo z pevného kilového závaží a pohyblivého závaží o váze 32 kg. Posouváním pohyblivého závaží bylo možné dosáhnout izochronismu, čili časové shody obou oscilačních os. Při tomto měření reverzním kyvadlem pak stačí měřit čas – dobu kyvu – a vzájemnou vzdálenost obou os otáčení. U reverzního kyvadla není důležité znát polohu těžiště kyvadla (Janák, 2010).



Obrázek 4. 1 – Reverzní kyvadlo (Zdroj: Torge, 2001)

Díky sestavení reverzního kyvadla, viz obrázek 4. 1, se k praktickému měření tíže začalo používat fyzikální kyvadlo. Ideální aproximací fyzikálního kyvadla je matematické kyvadlo, které zanedbává odpor vzduchu při pohybu kyvadla i tření závěsu.



Obrázek 4. 2 – Matematické kyvadlo (Zdroj: Torge, 2001)

V obrázku 4. 2 je  $m$  hmotnost závaží,  $l$  délka závěsu a  $\varphi$  úhel vychýlení závěsu. Základní vztah je (Novák [online], 2006)

$$ml \frac{d^2\varphi(t)}{dt^2} + mg \sin\varphi(t) = 0. \quad (4 - 1)$$

Přesnost měření tíže pomocí kyvadla je až  $10^{-6} \text{ m s}^{-2}$ .

Ve stejném období došlo k rozvoji relativního gravimetrického měření za pomoci relativních kyvadel, čili kyvadel s konstantní délkou a jednou oscilační osou.

Dnes se kyvadlo již nepoužívá, neboť existují přesnější metody měření tíhového zrychlení, viz dále.

#### 4.1.2 Volný pád

Volný pád je jedním z nejjednodušších pohybů v tíhovém poli Země. Jedná se o pohyb rovnoměrně zrychlený (ve vakuu) s nulovou počáteční rychlostí a se zrychlením, které se rovná tíhovému zrychlení  $g$ .

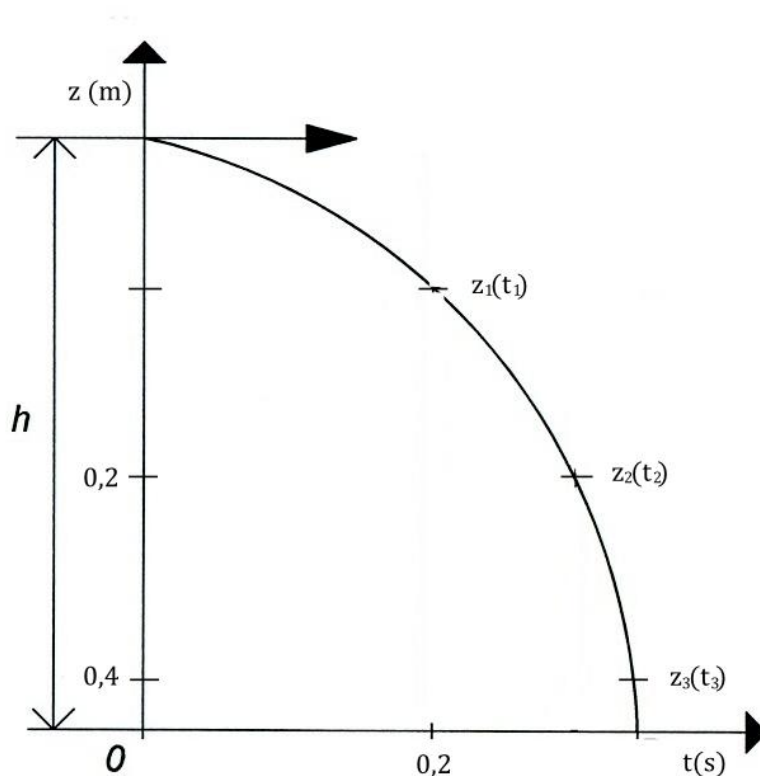
Pro popsání metody měření tíže pomocí volného pádu použijeme pohybovou rovnici, která vychází z Newtonových pohybových zákonů. Pohybová rovnice je diferenciální

rovnice druhého řádu, kde se derivuje dráha pohybu  $z$  podle času (Novák [online], 2006)

$$m \frac{d^2 z(t)}{dt^2} = mg, \quad (4-2)$$

kde  $m$  je hmotnost padajícího tělesa,  $g$  je tíhové zrychlení,  $t$  je čas a  $z$  je dráha.

Principem měření je určení párů hodnot  $z$  a  $t$ , tedy současné měření dráhy a doby volného pádu, viz obrázek 4. 3.



Obrázek 4. 3 – Princip metody měření tíže pomocí volného pádu

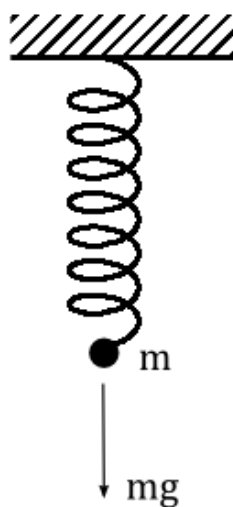
Přesnost měření tíže pomocí volného pádu je  $\pm 10^{-8} \text{ m s}^{-2}$ . Na základě metody volného pádu fungují absolutní balistické gravimetry, viz kapitola 4.2.3.

Období 2. poloviny 20. století se neslo v duchu prvních experimentů, kdy Mezinárodní výbor pro váhy a míry ve Francii a Národní fyzikální laboratoř v Anglii poprvé pokoušely změřit dráhu a čas při volném pádu. V roce 1946 se C. Volet zasloužil o první pokusy změřením absolutního tíhového zrychlení pomocí volného pádu. J. E. Faller využil v roce 1965 spojitě měření vzdáleností během volného pádu pomocí

světelného interferometru. Pro tento pokus byl poprvé v roce 1967 použit laserový interferometr, který zvýšil přesnost měření. Veškeré pokusy probíhaly výhradně v laboratorních podmínkách. Je třeba zmínit, že měření veličin při volném pádu nebylo vykonávané spojitě, ale diskrétně, a to pomocí fotograficko – optických metod. Přesnost měření absolutní hodnoty tíhového zrychlení se postupem času zvyšovala od  $10 \mu\text{m s}^{-2}$  až po  $2 \mu\text{m s}^{-2}$  (Janák, 2010).

#### 4.1.3 Pružinový gravimetr

Britský fyzik R. Hook popsal zákon (Hookeův zákon), který říká, že při pružné deformaci je normálové napětí pružiny přímo úměrné jejímu relativnímu prodloužení. Pružinový gravimetr má různé konstrukční provedení např. translační pohyb (obrázek 4. 4), rotační pohyb a princip vahadla. Při translačním pohybu konají všechny body tělesa (v našem případě pružina) pohyb po stejných, pouze navzájem posunutých, trajektoriích. Rotační pohyb je takový pohyb tuhého tělesa, kdy se všechny body pružiny otáčejí kolem jedné společné osy se stejnou úhlovou rychlostí.



Obrázek 4. 4 – Translační pohyb pružiny při zatížení hmotností  $m$

Získání hodnoty tíhového zrychlení  $g$  lze dostat na základě měření protažení pružiny  $\Delta l$ .

Základní vztah je dán jednoduchou úměrou

$$mg = k \Delta l, \quad (4 - 3)$$

kde  $m$  je hmotnost,  $\Delta l$  je protažení pružiny a  $k$  je materiálová konstanta pružiny.



Přesnost měření tíže pomocí pružiny je v řádu  $\mu\text{m s}^{-2}$ .

Pružinový gravimetr se používá v relativní gravimetrii, kde se měří rozdíly tíhového zrychlení mezi dvěma stanicemi či na jedné stanici v různých časových etapách. Pro geodetická měření je používán od 50. let 20. století. Dnešní gravimetry jsou pružinové systémy s horizontálně uloženým vahadlem.

#### 4.1.4 Supravodivý gravimetr

Supravodivý gravimetr je speciálním případem relativního gravimetru, kde je pružina nahrazena elektromagnetickým polem generovaným supravodivou cívkou. Tíže působící na levitující hmotný bod je kompenzovaná elektromagnetickým polem, které je generované supravodivými cívkami. Právě cívky zajišťují vysokou stabilitu měření v čase, která je hlavní prioritou supravodivých gravimetrů.

Přesnost měření tíže je  $5 \times 10^{-8} \text{ m s}^{-8}$ .

V roce 1831 objevil M. Faraday elektromagnetickou indukci a dokázal, že elektřina a magnetismus jsou dva různé projevy stejného jevu a to elektromagnetismu.

Významnou osobností v objevu supravodivosti byl nizozemský fyzik H. K. Onnes, který v roce 1911 objevil supravodivost čistých kovů.

Roku 1967 byl navržen supravodivý gravimetr, který byl v USA roku 1975 poprvé sestaven.

Závěrečné shrnutí pozemních gravimetrických metod:

Metoda	Přístroj	Přesnost [ $\mu\text{m s}^{-2}$ ]
relativní	kyvadlo	5
	pružinový gravimetr	0,05
	supravodivý gravimetr	0,05
absolutní	kyvadlo	5
	volný pád	0,01

## 4.2 Přístrojové vybavení

### 4.2.1 Kyvadlo

Jak již bylo uvedeno v části 4.1.1., v minulosti se pro absolutní i relativní tíhová měření tíže používala kyvadla. Od konce 17. století až do 20. let 20. století byly kyvadlové přístroje jedinými přístroji pro tíhová měření. Následně se začaly používat přesnější mechanické gravimetry, ale ještě v 50. letech 20. století byly kyvadlové přístroje pro tíhová měření velmi důležité, jelikož byly cennou kontrolou při měření gravimetry.

V dnešní době jsou kyvadla plně nahrazena gravimetry, které dosahují přesnějších výsledků s menšími náklady a výraznou časovou úsporou (Olejník, 1997).

### 4.2.2 Mechanické relativní gravimetry

Janák (2010) uvádí, že všechny mechanické gravimetry se skládají z těchto částí:

- **měřicí systém** (= nejdůležitější část přístroje plní funkci tíhového senzoru díky pružinovému systému),
- **systém odečítání** (= měření změny tíhové síly působící na rovnovážnou polohu),
- **urovňovací zařízení** (= obsahuje dvě na sebe kolmé libely, díky nimž dokážeme urovnat měřicí systém),
- **kompenzační a stabilizační systém** (= jedná se o systém, který má za úkol kompenzovat vnější vlivy tak, aby nedocházelo ke změně rovnovážné polohy gravimetru),
- **zdroj napětí** (= baterie).

Dnešní gravimetry většinou fungují na principu elektronického odečítání a automatizovaného měření.

#### 4.2.2.1 Scintrex CG3 Autograv

Tento gravimetr se začal vyrábět roku 1987 americkou společností Scintrex Co. Měl odstranit manuální registraci dat u starších modelů. Zároveň byl přizpůsoben k polnímu měření i svojí nízkou hmotností, která i s baterií činí 12 kg.

Tento přístroj dokáže automaticky nastavit měřicí systém do rovnovážné polohy. Zároveň umožňuje automatické odečítání měřených hodnot.

Měřicí systém je tvořen z křemenného skla a právě křemenná pružina svojí silou kompenzuje testovací hmotu, na kterou působí tíhová síla. To znamená, že poloha testovací hmoty se mění se změnou tíhového zrychlení. Poloha testovací hmoty je sledována kapacitním snímačem. Systém pro zpětnou vazbu automaticky vyšle jednosměrné napětí do kapacitní destičky, kde vznikne elektrostatická síla. Tato síla pak vrátí měřicí systém do rovnovážné polohy. Potřebné napětí je přímo úměrné relativní hodnotě tíhového zrychlení v bodě měření.

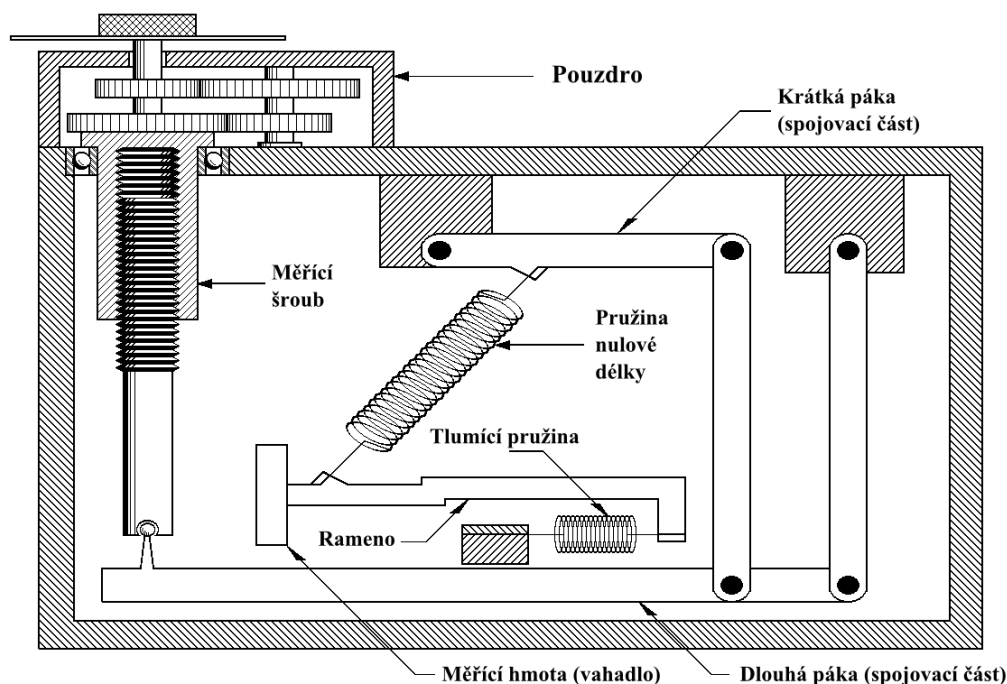
Toto napětí se změní na digitální signál a transformuje se do jednotek tíhového zrychlení. Následně se vše uloží do paměti gravimetru, která disponuje velikostí 16 kB (= měření na 420 bodech).

Dalšími výhodami gravimetru je automatické urovnání sklonu pomocí elektronických sklonoměrů, automatická kontrola a kompenzace vnitřní teploty přístroje a automatické zavedení opravy na variace slapového zrychlení.

Samotné měření probíhá v sekundových intervalech s přesností 0,01 mGal. Délka měření na jednom bodě se volí v rozmezí 20 – 60 s a výsledná hodnota se bere jako aritmetický průměr všech hodnot.

#### **4.2.2.2 LaCoste & Romberg gravimetry G a D**

Tyto gravimetry využívají jako měřicí prvek pružinu nulové délky. Pružina nulové délky je pružina, kdy graf (závislosti) protažení pružiny na síle extrapoluje do nulové délky při nulové síle. Síla působící na pružinu je přímo úměrná její délce. Na obrázku 4.5 vidíme, že pružina je umístěna šikmo mezi dvěma rameny. Horizontální rameno nese testovací hmotu o hmotnosti cca 10 gramů. Horní bod měřicí pružiny nulové délky leží nad horizontální rotační osou. Poloha horizontálního ramene je odečítána elektronicky. Odečítání se provádí buď externím digitálním voltmetrem, nebo pomocí zabudovaného galvanometru. Při měření se používá metoda nulové polohy, kdy se měřicí systém nastaví do nulové polohy definované horizontální polohou ramene. Nastavení se provádí automaticky za pomoci kompenzační elektrostatické síly pracující v obvodu se zpětnou vazbou (Šimon, 1995).



Obrázek 4. 5 – Schéma gravimetru LaCoste and Romberg

(Zdroj: <http://www.microglacoste.com>)

LaCoste-Romberg gravimetry existovaly ve dvou verzích – typ G a D. Rozdíl mezi nimi je především v přesnosti a v rozsahu měření. Přesnost modelu G je menší než 0,04 mGal, model D má přesnost menší než 0,01 mGal. Hmotnost obou přístrojů i s baterií se pohybuje okolo 5,5 kg (Janák, 2010).

#### 4.2.2.3 ZLS BURRIS

Tento gravimetr vyrábí společnost ZLS, která převzala metodu pružiny nulové délky a na základě znalosti práce s tímto měřícím systémem vyrábí relativní gravimetr ve dvou verzích:

- gravimetr s kalibrovaným mikrometrickým šroubem,
- gravimetr s nekalibrovaným mikrometrickým šroubem.

Gravimetr ZLS je částečně automatizovaný. Automaticky odečte a uloží získaná data. K provádění měření je ale potřeba operátora. Jeho hmotnost je i s baterií 5,9 kg.

Gravimetr ZLS BURRIS (obrázek 4. 6) s nekalibrovaným mikrometrickým šroubem je součástí vybavení Fakulty aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni, katedry matematiky – oddělení geomatiky v Plzni. Jeho výhodou je snadné používání studenty

při výuce v terénu. Gravimetr ZLS umožňuje automatickou registraci dat vysoké přesnosti (5 – 7  $\mu\text{Gal}$ ) (Janák, 2010).



Obrázek 4. 6 – Gravimetr ZLS BURRIS (Zdroj: <http://zlscorp.com/prod01.htm>)

### 4.2.3 Absolutní balistické gravimetry

Balistická metoda (metoda volného pádu) se používá pro určení absolutní hodnoty tíhového zrychlení. Ke zvýšení přesnosti balistických gravimetrů bylo použito laserového interferometru na spojitě měření dráhy volného pádu.

#### 4.2.3.1 Absolutní gravimetr FG5

Gravimetr FG5 je vyráběn od roku 1993. Na objednávku jej vyrábí americká firma Micro-g Solutions. V současné době je to nejpresněji měřící gravimetr využívající nesymetrickou<sup>5</sup> metodu. Dráha volného pádu je měřena pomocí interferometru. Zdrojem světla je velmi přesný He – Ne laser, stabilizovaný za pomoci jódu. Měření přesného času je zajištěno atomovými hodinami.

Volný pád je prováděn na vzdálenost 20 cm, kde vznikne cca 700 000 interferenčních proužků, poskytujících informaci o dráze pádu pozorovaného objektu. Zaregistruje se ale pouze každý tisící proužek, který v sobě nese informaci o čase, měřeném atomovými hodinami. Díky tomu dostáváme 700 dvojic měřených údajů (dráha a čas),

---

<sup>5</sup> Symetrické měření = měření pohybu nahoru a dolů.

ze kterých lze spočítat zrychlení volného pádu. Přesnost určení tíhového zrychlení je přibližně  $2 \times 10^{-8} \text{ m s}^{-2}$  (2  $\mu\text{Gal}$ ). Měření na jednom bodě trvá přibližně 12 hodin, přičemž je důležité zajistit na stanovišti přibližně stejnou okolní teplotu. Gravimetr je transportní, určený pro měření v interiéru, jelikož svojí váhou 150 kg a potřebou logistického zázemí je do terénu nevhodný.

Nevýhodou balistického gravimetru je jeho omezená životnost. Každý volný pád přístroj opotřebovává. U gravimetru FG5 je zaručena životnost na cca 250 000 volných pádů.

### **Hlavní části gravimetru FG5**

#### ***- Pádová komora***

Pádová komora je místo, kde je vytvořené vysoké vakuum o  $10^{-4} \text{ Pa}$ . K této hodnotě můžeme dojít dvoustupňovou vakuovou pumpou. První stupeň tvoří membránová pumpa a druhý stupeň turbomolekulární pumpa. Díky vakuové pumpě je možno vytvořit podtlak  $10^{-3} \text{ Pa}$ . Až díky druhému kroku, čili iontové pumpě, která odsaje zvýšení molekuly plynu, vznikne v jádrové komoře vakuum  $10^{-4} \text{ Pa}$ . Iontová pumpa je zapnuta po celou dobu měření.

#### ***- Laserový interferometr***

Jak už bylo zmíněno, pro zdroj laserového záření je použito He – Ne laseru o vlnové délce 633 nm, který je stabilizovaný iodovými parami. Laserový paprsek je optickým kabelem veden do interferometru. Tento paprsek je rozdělen na (obrázek 4. 7):

- testovací paprsek – sleduje padající testovací objekt,
- referenční paprsek – zůstane v interferometru.

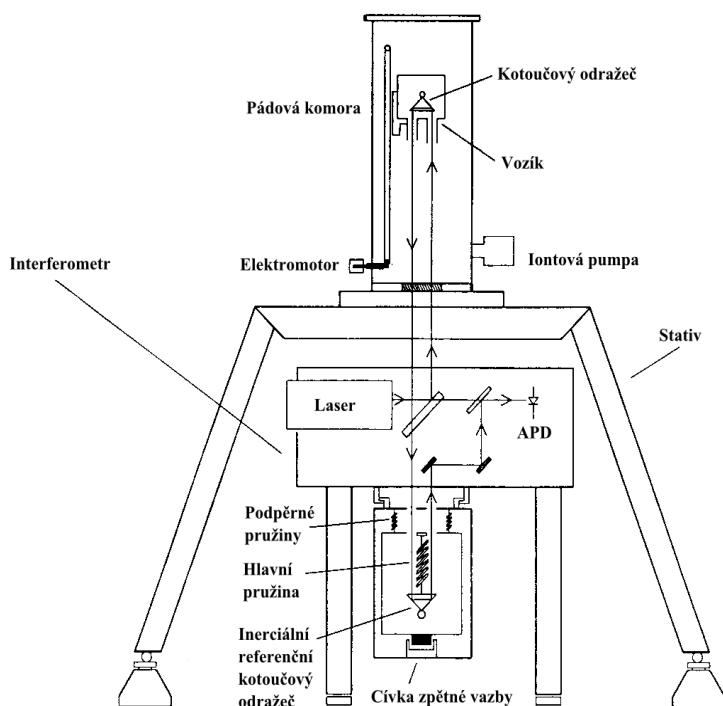
Spojením těchto dvou paprsků vznikají interferenční proužky, které nám udávají již zmíněný údaj o čase (vzdálenosti).

#### ***- Super – pružina***

Jedná se o pružinový systém s periodou 60 s. Je zřejmé, že pružina mající takovou vlastnost by musela měřit cca 1 km. Super – pružina ale měří pouze 30 cm. Dokáže elektronicky napodobit pohyby dlouhé pružiny. Super – pružina má za účel eliminaci vlivu otřesů přístroje při měření.

## - *Atomové hodiny*

Atomové hodiny, čili atomový oscilátor, dokáží určit čas se stabilitou  $10^{-10}$ .



Obrázek 4. 7 – Schéma balistického gravimetru FG5 (Zdroj: <http://oko.asu.cas.cz>)

### **Princip měření**

Práce s gravimetrem FG5 se zaměřuje na určení absolutní hodnoty tíhového zrychlení měřením času a dráhy.

Samotné připravení přístroje na stanovisku se pohybuje okolo dvou hodin.

Během průběhu jednoho volného pádu se zaznamená 700 časových údajů spojených s polohou padajícího tělesa. Z těchto dat se spočítá střední hodnota tíhového zrychlení a její směrodatná odchylka. Volný pád se opakuje každých 10 s.

Měření se vždy rozdělí na 12 – 48 sérií. Každou sérii tvoří přibližně 100 volných pádů. Série se opakují každou hodinu. Je zřejmé, že výslednou hodnotu tíhového zrychlení získáme průměrem z jednotlivých sérií.

Gravimetr FG5 je vybaven firemním softwarem, který zajišťuje registraci dat v reálném čase a zároveň zpracování a analýzu dat po měření.

Při zpracování naměřených tíhových dat nesmíme opomenout opravy:

- slapové zrychlení ( $\pm 150 \mu\text{Gal}$ ),
- odstředivé zrychlení kvůli pohybujícímu se pólu ( $\pm 5 \mu\text{Gal}$ ),
- změny atmosférických hmot,
- konečná rychlost světla.

### **Využití v České republice**

Absolutní gravimetr FG5 č. 215 je od roku 2001 součástí gravimetrické laboratoře na Geodetické observatoři Pecný v Ondřejově u Prahy. Je používán k periodickému měření tíže na absolutním tíhovém bodě Pecný a na vybraných tíhových bodech české gravimetrické sítě. V roce 2004 proběhlo v České republice první srovnávací měření absolutních gravimetrů s účelem ověření jejich přesnosti.

#### **4.2.3.2 Polní absolutní balistický gravimetr A10**

Tento gravimetr je opět vyráběn firmou Micro-g Solutions. Jedná se o gravimetr určený pro měření v terénu uzpůsobený k extrémním povětrnostním a teplotním podmínkám. A10 je přibližně o 70 kg lehčí než FG5, čehož je dosaženo zmenšením tzv. super – pružiny i pádové komory. To znamená, že volný pád se realizuje na dráze představující pouze několik centimetrů.

Laserový interferometr se stabilizuje pomocí ML – 1 polarizace.

A10 je tvořen ze dvou částí – horní a dolní. V horní části je umístěna pádová jednotka a v dolní části se nachází zmíněná super – pružina.

Při měření na stanovisku je možné dosáhnout přesnosti až  $10^{-7} \text{ m s}^{-2}$  ( $10 \mu\text{Gal}$ ).

#### **4.2.3.3 Atomový gravimetr**

Do absolutních balistických gravimetrů můžeme zařadit i atomový gravimetr využívající princip atomové interferometrie. Díky atomové interferometrii dojde k převedení atomu do jiných energetických úrovní, s čím se pojí dvě prostorově oddělené hmotné vlny. Tyto vlny se nadále šíří po různých drahách.

Když dojde k jejich spojení, vlny interferují. A právě interferenční signál je funkcí zrychlení volného pádu. Představení konceptu atomového gravimetru se datuje k roku



1991. Atomový gravimetr není v provozu, jelikož se stále jedná o budoucnost v měření tíhových dat.

#### 4.2.4 Supravodivé gravimetry

První supravodivý gravimetr byl vyvinutý koncem 60. let 20. století. Jedná se o zvláštní skupinu relativních gravimetrů, kde je pružina nahrazena elektromagnetickým polem. Vysoké stability měření se dosahuje navozením supravodivého stavu měřicího systému. Supravodivý stav je vlastnost, kdy při určité kritické teplotě přestane působit elektrický odpor v daném materiálu.

Důležitými základními částmi jsou *supravodivá koule (sféra)* a *supravodivé cívky*. Supravodivá sféra je testovací hmotou, která se vyrábí z niobu. Cívky vytvářejí magnetické pole, které působí na testovací hmotu obdobně jako tíhové pole, s tím rozdílem, že působí v opačném směru. Správným nastavením magnetického pole je koule uvedena do vznášejícího se stavu (= levitace). Polohu koule monitorují kapacitní snímače.

Změny tíhového zrychlení jsou kompenzovány elektromagnetickou silou, která je vytvořena supravodivými cívkami. Změny proudu na cívkách, které svým elektromagnetickým polem udržují kouli levitovat, představují měřenou veličinu supravodivého gravimetru.

Testovací hmota a snímače polohy jsou uzavřeny v měděném pouzdře se supravodivým magnetickým těsněním. Toto pouzdro je umístěné ve vakuu a v teplotně stálém prostředí. Všechny tyto komponenty obklopuje vnější měděný plášť. Na závěr je tento systém uložen v dewarové nádobě (= vakuová nádoba bez víka nebo s víkem záměrně netěsnícím), která zajišťuje teplotní izolaci a je naplněna tekutým héliem.

V současnosti se jedná o nejpřesnější (0,1  $\mu\text{Gal}$ ) relativní gravimetry. Supravodivé gravimetry jsou vhodné pro dlouhodobé pozorování změn tíhového zrychlení se širokým rozsahem měřitelných period.

Přístroje pracující na principu supravodivého stavu vyrábí pouze jedna společnost, a to GWR Instruments v USA. Jelikož se jedná o velmi drahé přístroje, a zároveň i přístroje velmi nákladné na provoz, vyskytuje se na světě přibližně 25 kusů tohoto gravimetru. Vlastníci těchto přístrojů spolupracují v rámci projektu Mezinárodní geodetické asociace – Globální geodynamický projekt.

V České republice je od roku 2007 na Geodetické observatoři Pecný v provozu Supravodivý gravimetr OSG – 050.

Druhy supravodivých gravimetrů:

- GWR Observatory Superconducting Gravimeter (OSG),
- GSU – 4D,
- iGrav<sup>TM</sup> SG Meter.

Jednotlivé supravodivé gravimetry se od sebe liší minimálně. Například počtem supravodivých sfér, systému chlazení nebo průměrem dewarové nádoby.

## 5 GRAVIMETRIE V ČESKÉ REPUBLICE

### 5.1 Gravimetrické základy České republiky

Jednotná gravimetrická (tíhová) síť České republiky obsahuje body, na kterých dochází k měření hodnot zemské tíže. Na těchto bodech je určena absolutní hodnota tíhového zrychlení, buď přímým měřením za pomoci absolutního gravimetru, nebo nepřímým odvozením z jiného bodu pomocí relativního měření tíhového zrychlení.

Kromě tíhového zrychlení musí být na gravimetrických bodech určená i přesná nadmořská výška (v systému Bpv) a horizontální nebo prostorová poloha.

Tíhové bodové pole České republiky tvoří:

<b><i>Základní tíhové bodové pole</i></b>	Absolutní tíhové body
	Body České gravimetrické sítě nultého a I. a II. řádu
	Body hlavní gravimetrické základny
<b><i>Podrobné tíhové bodové pole</i></b>	Body gravimetrického mapování
	Body účelových sítí

Základní tíhové bodové pole je tvořeno dvěma absolutními body, tj. body, na nichž proběhlo měření tíhového zrychlení absolutními balistickými gravimetry. Páteřním bodem gravimetrické sítě je absolutní bod, který se nachází na hlavním pilíři gravimetrické laboratoře Geodetické observatoře Pecný v Ondřejově u Prahy.

Síť nultého řádu je tvořena 11 body. 427 bodů tvoří síť I. a II. řádu. Hlavní gravimetrická základna obsahuje 26 bodů (3 její body jsou současně i body sítě nultého řádu). Celkem se v České republice nachází 463 tíhových bodů, které jsou plnohodnotnou součástí bodového pole našeho státu. Za jejich údržbu odpovídá Zeměměřický úřad v Praze (Olejník, 1997).

Podle znění vyhlášky č. 31/1995 Sb. jsou body základního tíhového bodového pole umístěny na klidných místech vzdálených od komunikací, průmyslových vibrací, vodních toků a nádrží a zdrojů elektromagnetického pole. Absolutní tíhové body se zřizují zpravidla v suterénech veřejných budov s betonovou podlahou a s 1 až 2 excentrickými body mimo budovy. Tyto body jsou stabilizovány bronzovým hřebem.

Ostatní body tíhového bodového pole jsou stabilizovány betonovým pilířem zakončeným betonovou nebo žulovou deskou na úrovni terénu. Body podrobného tíhového pole jsou voleny na trvale označených bodech polohového a výškového bodového pole.

Pro ochranu bodů je u většiny z nich použita červenobílá ochranná tyč s výstražnou tabulkou nesoucí nápis „TÍHOVÝ BOD. POŠKOZENÍ SE TRESTÁ“.

Zeměměřický úřad v Praze vede databázi bodových polí, která poskytuje údaje o základních tíhových bodech. Údaje obsahují:

- číslo a název tíhového bodu,
- lokalizační údaje o územních jednotkách (okresu, obci), označení listu státního mapového díla,
- zeměpisné souřadnice, nadmořskou výšku a hodnotu tíhového zrychlení,
- místopisný náčrt s vyhledávacími mírami, místopisný popis a údaj o výškovém připojení,
- druh značky stabilizace,
- údaje o zřízení tíhového bodu,
- vzor údajů o bodu československé tíhové sítě.

Údaje o podrobném tíhovém bodu obsahují veškeré informace uvedené u základního tíhového bodu doplněné o hodnotu topografické korekce a hodnotu úplné Bouguerovy tíhové anomálie.

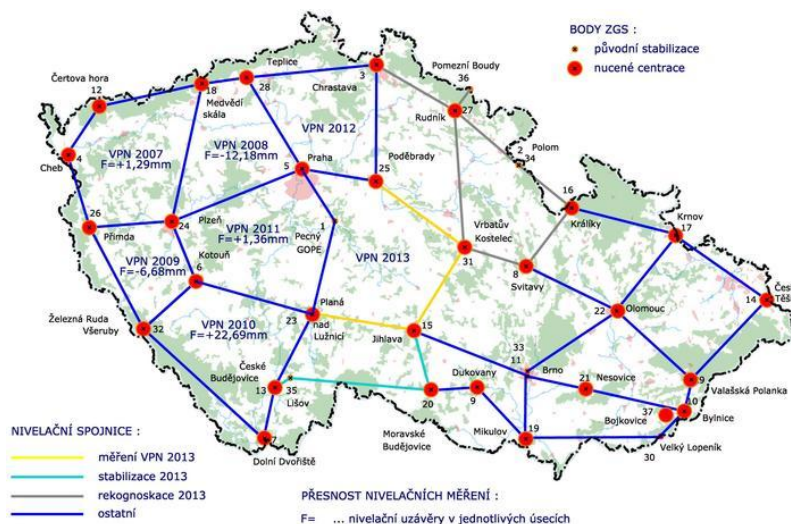
Střední chyba tíhového zrychlení bodů základního tíhového bodového pole nepřekračuje hodnotu 2,5  $\mu\text{Gal}$  (vzhledem k absolutním tíhovým bodům). Gravimetrická síť se pravidelně udržuje pomocí relativních gravimetrů.

V roce 1959 byla vybudována hlavní gravimetrická základna, která slouží ke kalibraci gravimetrů a k definici rozměru gravimetrické sítě. Základna prochází severojižním směrem Hřensko – Dolní Dvořiště napříč Českou republikou. Její délka je 300 km, výškový rozdíl činí 500 m a tíhový rozdíl je 300 mGal.

Pro sledování změn tíhového pole byla v České republice zřízena Základní geodynamická síť (ZGS), která je složená z kvalitních geodynamických bodů, sloužících ke sledování pohybů zemského povrchu (obrázek 5. 1). Tato síť je od roku

2003 obnovována novými stanovisky, která mají hloubkovou stabilizaci doplněnou o nucenou centraci pro připojení antény GNSS a žulovou desku pro gravimetrická měření.

ZGS je pravidelně zaměřována metodou GNSS, velmi přesnou nivelací a gravimetricky. ZGS je připojena do Evropské výškové sítě (EUVN).



Obrázek 5. 1 – Základní geodynamická síť České republiky  
(Zdroj: <http://www.cuzk.cz/>)

## 5.2 Gravimetrie na Geodetické observatoři Pecný

Centrem gravimetrických aktivit v oboru geodézie v České republice je Geodetická observatoř (GO) Pecný v Ondřejově u Prahy. Jedná se o experimentální pracoviště Výzkumného ústavu geodetického, topografického a kartografického (VÚGTK), v. v. i. Toto pracoviště je určeno pro experimentální geodetický výzkum. Je vybaveno kvalitními geodetickými přístroji, včetně gravimetrů ve své gravimetrické laboratoři.

### 5.2.1 Gravimetrická laboratoř na GO Pecný

Gravimetrická laboratoř na GO Pecný je vybudována ve sklepní části hlavní budovy observatoře. Laboratoř je uzpůsobena k testování a zkouškám gravimetrů, tj. k úřednímu ověření přesnosti stupnic gravimetrů pomocí náklonu a ke zkouškám na vliv magnetického pole na gravimetrická měření. Významnou součástí laboratoře jsou čtyři různě velké pilíře. Tyto pilíře slouží k opakovaným gravimetrickým měřením, především absolutním gravimetrem FG5.

Na hlavním pilíři této laboratoře se nachází absolutní tíhový bod, který je možné považovat za referenční tíhový bod české gravimetrické sítě (základní gravimetrický bod České republiky). Absolutní tíhová měření jsou zde pravidelně opakována s využitím mezinárodní spolupráce.

Součástí gravimetrické laboratoře je slapová stanice. Tato stanice je součástí Mezinárodního centra pro zemské slapy. Je zde vedena nepřetržitá registrace vertikální složky zemských slapů, které jsou vyvolány přímým slapovým účinkem Měsíce a Slunce, deformacemi Země slapovými silami, gravitačním účinkem vodních hmot v oceánech a deformacemi Země způsobenými jejich tíhou (Brož, Šimon & Pálinkáš, 2010).

Slapová stanice se skládá ze tří místností. Dvě z nich slouží ke kontinuálnímu měření změn tíhového zrychlení pomocí pružinového gravimetru LaCoste-Romberg G č. 137 a supravodivého gravimetru OSG - 050. Třetí místnost je uzpůsobena k registraci dat.

***Poznámka:** Slapové jevy jsou periodické deformace zemského tělesa způsobené slapovými silami. Slapová síla je druhotným účinkem gravitační síly, která se projevuje např. přílivem a odlivem. Slapové jevy je důležité znát a přesně definovat, jelikož mají vliv na rychlost zemské rotace, která ovlivňuje gravitační měření.*

### **5.2.2 Přístrojové vybavení na GO Pecný**

Experimentální měření probíhají v gravimetrické laboratoři. Díky lepšímu vybavení laboratoře se od roku 2001 výrazně zvýšil počet aplikací poskytovaných tíhovými daty při vyšetřování geodynamických jevů.

#### Přístroje:

##### **- Absolutní gravimetr FG5 č. 215**

Tento gravimetr, vyroben firmou Micro-g Solutions, Inc. v USA, byl uveden do provozu v srpnu roku 2001.

Absolutní gravimetr se na GO Pecný používá pro periodické měření absolutní tíže a pro porovnání dosažených dat s daty naměřenými supravodivým gravimetrem OSG - 050. Dále se s přístrojem měří na vybraných bodech české gravimetrické sítě a při srovnávacích měření absolutních gravimetrů.

Gravimetr FG5 č. 215 (obrázek 5. 2) je státním etalonem pro tíhové zrychlení v České republice. Výsledky odvozené z měření tímto gravimetrem jsou velmi významné v mezinárodním kontextu, především z pohledu geovědního a metrologického (Vařko, Pálinkáš a Kostecký, 2013).

Důležitým krokem k přesně naměřeným hodnotám je kalibrace přístroje, čili provedení mezinárodního srovnání absolutních gravimetrů. V roce 2004 proběhlo v České republice první srovnávací měření absolutních gravimetrů na stejném místě za stejný čas. Jednalo se o přístroje FG5 č. 215 a FG5 č. 101. Tato srovnávací měření napomáhají ke zkvalitnění práce s přístrojem.

- ***Supravodivý gravimetr OSG – 050***

Gravimetr OSG – 050 (obrázek 5. 3) byl instalován na observatoři v únoru roku 2007. Jedná se o výrobek firmy GWR, Inc. v USA. Prostředky pro zakoupení poskytlo Výzkumné centrum dynamiky Země (CEDR). Tento supravodivý gravimetr je jednosférový, což znamená, že je vybaven jedním testovacím tělesem. Princip supravodivého gravimetru umožňuje nejcitlivější měření časových změn tíhového zrychlení na observatoři. Jeho přesnost se pohybuje v řádu 0,1  $\mu\text{Gal}$  (Volařík, 2011).

Na obrázku 5. 4 je ukázka záznamu tíhových změn měřených na GO Pecný supravodivým gravimetrem OSG – 050 spolu s křivkou představující atmosférický tlak.

Supravodivý gravimetr se na observatoři používá pro kontinuální měření časových změn tíhového zrychlení, které zahrnují zjišťování informací o zemských slapech, pohybech zemského jádra a pólů nebo informací o volné oscilaci Země.

- ***LaCoste – Romberg G č. 137***

Na observatoři je gravimetr v provozu od roku 2000. Slouží opět ke sledování slapových variací tíhového zrychlení.

Kalibrace přístroje je zajištěna souběžným měřením s absolutním gravimetrem FG5 č. 215.

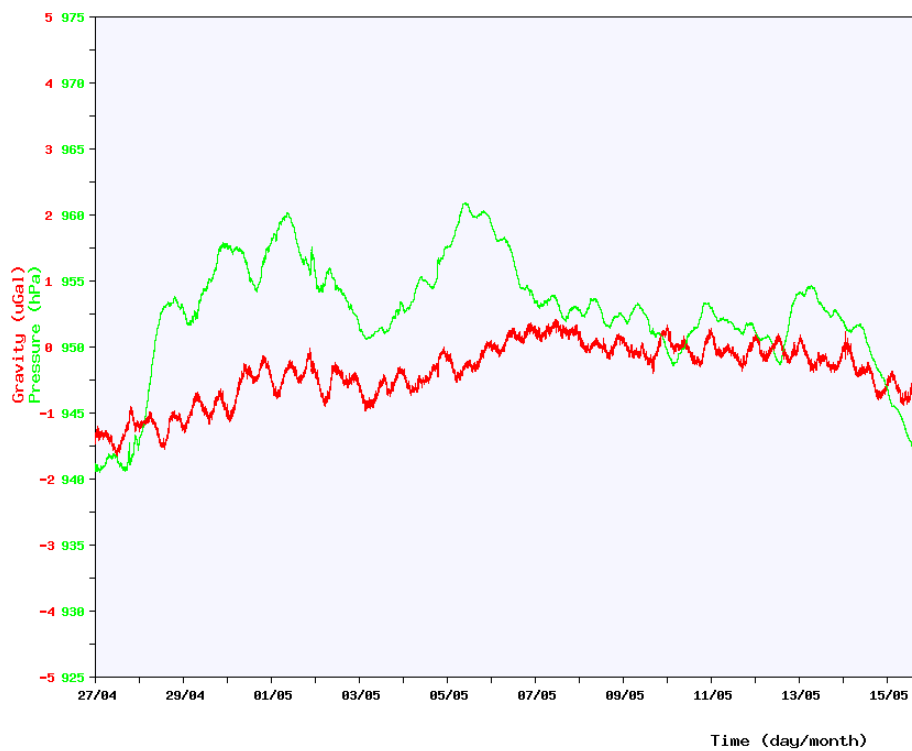


Obrázek 5. 2 – Absolutní gravimetr  
FG5 č. 215



Obrázek 5. 3 – Supravodivý  
gravimetr OSG – 050

(Zdroj: <http://oko.asu.cas.cz/pecny/>)



Obrázek 5. 4 – Záznam tíhových změn gravimetrem OSG – 050 na stanici GO Pecný

(Zdroj: <http://oko.asu.cas.cz/grav/>)



### 5.3 Probíhající práce v oblasti české gravimetrie

Hlavní oblasti vývoje a aplikací české gravimetrie v oboru geodézie lze shrnout takto:

- globální geodynamika,
- regionální geodynamika,
- gravimetrie v závislosti na životním prostředí,
- zakládání gravimetrických sítí,
- metrologie v oblasti tíhových měření,
- testování gravimetrů.

V současné době probíhá kontinuální měření vertikální složky zemských slapů. Měření se provádějí dostupnými gravimetry na Geodetické observatoři Pecný. Výsledkem analýzy těchto dat byl výpočet nových slapových parametrů na stanici Pecný a byla sestavena nová slapová analýza příslušných dat (VÚGTK, 2010). Došlo k detailnějšímu rozdělení slapových vln a zároveň analýza ukázala, že stálým problémem slapových porovnání jsou atmosférické korekce (vliv atmosférických hmot na měření tíže).

Dále probíhá důkladná analýza gravimetrických záznamů, které jsou pořizovány supravodivým gravimetrem OSG – 050. Byla vypracována metodika, která umožnila porovnání více gravimetrů v rámci Globálního geodynamického projektu (Global Geodynamics Project). Dále byla zpracována kvalitní analýza šumu a kontrola kvality dat pořízených tímto gravimetrem. Supravodivý gravimetr OSG – 050 byl vyhodnocen jako přístroj vhodný pro řešení problematiky dlouhoperiodických seizmických vln a vlastních kmitů Země.

EPOCHOVÁ absolutní tíhová měření jsou od roku 2001 prováděna výhradně absolutním gravimetrem FG5 č. 215. Tento gravimetr je státním etalonem pro tíhové zrychlení. Ve spolupráci s Mezinárodním úřadem pro váhy a míry (BIPM) se v roce 2011 řešila otázka ohledně gravitačního efektu přístroje na měřenou hodnotu zrychlení a její dopad na mezinárodní srovnávací měření absolutních gravimetrů, které proběhlo v roce 2009 (VÚGTK, 2011).

## 6 PŘÍKLAD ZPRACOVÁNÍ GRAVIMETRICKÉHO MĚŘENÍ

V této kapitole si předvedeme ukázkou zpracování dat naměřených metodou pozemní gravimetrie (použit byl relativní gravimetr Burris ZLS). Jedná se o určení hodnoty tíhového zrychlení na bodě Nečtiny, který je používán pro podrobná gravimetrická měření studenty ZČU při výuce v terénu.

Hodnota tíhového zrychlení na bodě Nečtiny byla určena opakovaným měřením rozdílu tíhového zrychlení mezi body Chudeč (bod 1. řádu české gravimetrické sítě) a Manětín (bod 2. řádu). Hodnoty tíhového zrychlení na těchto dvou bodech, viz tabulka 6. 1, jsou pro účely určení hodnoty tíhového zrychlení na bodě Nečtiny považovány za bezchybné.

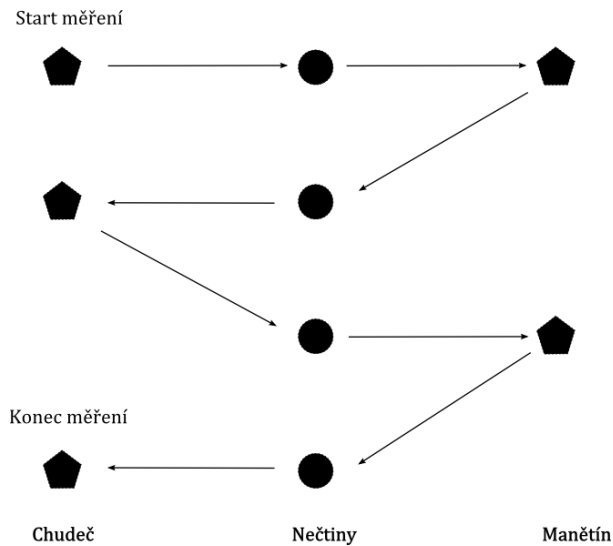
*Tabulka 6. 1 Hodnoty tíže na známých bodech*

Název bodu	g [mGal]
Chudeč	980919,333
Manětín	980969,557

Naměřené hodnoty rozdílů tíhového zrychlení a příslušné časy jsou uvedeny v tabulce 6. 2. Pro určení chodu gravimetru byla při měření použita tzv. hvězdicová metoda, viz obrázek 6. 1.

*Tabulka 6. 2 měřené hodnoty rozdílů tíhového zrychlení*

Název bodu	Čas (hod)	Čtení (mGal)
Chudeč	11,51792	-25,0995
Nečtiny	11,98875	-6,5295
Manětín	12,55487	25,2060
Nečtiny	12,97847	-6,5220
Chudeč	13,34750	-25,0085
Nečtiny	13,74888	-6,5305
Manětín	14,09611	25,1935
Nečtiny	14,48542	-6,5445
Chudeč	14,86083	-25,0290



Obrázek 6.1 – Schéma měření

K řešení neznámé tíže byl použit následující matematický model – observační rovnice:

$$\Delta g_{ij} = g_j - g_i + k(t_j - t_i), \quad (6 - 1)$$

kde  $t$  je čas měření,  $k$  je chod gravimetru a  $\Delta g_{ij}$  je měřený rozdíl.

V tomto modelu je chod gravimetru  $k$  uvažován jako lineární funkce času, což je vzhledem ke krátkému časovému úseku měření (cca 3 hod) a kvalitě gravimetru přijatelná aproximace.

Přepsáním soustavy observačních rovnic do maticové formy vznikne rovnice:

$$\mathbf{l} = \mathbf{Ax} + \mathbf{r}, \quad (6 - 2)$$

kde  $\mathbf{l} = (l_{12} + g_1, l_{23} - g_1, l_{34} + g_1, l_{45} - g_1, l_{56} + g_1, l_{67} - g_1, l_{78} + g_1, l_{89} - g_1)^T$ ,

$\mathbf{l} = (980937.903, -980937.8215, 980937.829, 980937.8195, 980937.811, 980937.833, 980937.819, 980937.8175)^T$ .

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & t_{12} \\ -1 & t_{23} \\ 1 & t_{34} \\ -1 & t_{45} \\ 1 & t_{56} \\ -1 & t_{67} \\ 1 & t_{78} \\ -1 & t_{89} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0.47083 \\ -1 & 0.56612 \\ 1 & 0.42360 \\ -1 & 0.36903 \\ 1 & 0.40138 \\ -1 & 0.34723 \\ 1 & 0.38931 \\ -1 & 0.37541 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{x} = (g_3 \quad k)^T.$$

Pro vyrovnání dat použijeme metodu nejmenších čtverců

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{l}, \quad (6-3)$$

kde matice normálních rovnic  $(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}$  je zároveň kovarianční matice  $\mathbf{C}_{\hat{\mathbf{x}}}$ .

Po výpočtu  $\hat{\mathbf{x}}$  následuje výpočet prvků vektoru oprav:

$$\hat{\mathbf{r}} = \mathbf{l} - \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}}, \quad (6-4)$$

kde  $\hat{\mathbf{r}} = [-0.0601, 0.0035, 0.0128, -0.0033, 0.0302, 0.0097, 0.0219, -0.0051]^T$ .

Následně vypočteme aposteriorní jednotkovou střední chybu:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{[\hat{\mathbf{r}}^T \hat{\mathbf{r}}]}{n-u} = \frac{[\hat{\mathbf{r}}^T \hat{\mathbf{r}}]}{8-2}. \quad (6-5)$$

Jelikož se chyba  $\hat{\sigma}_0^2$  liší od hodnoty 1, je nutné vypočítat kovarianční matici

$$\mathbf{C}_{\hat{\mathbf{x}}} = \hat{\sigma}_0^2 \mathbf{C}_{\hat{\mathbf{x}}}, \quad (6-6)$$

z čehož pro nás vyplývá nový odhad střední chyby

$$\hat{g}_3 \pm \hat{\sigma}_{\hat{g}_3},$$

$$\hat{k} \pm \hat{\sigma}_{\hat{k}}.$$

Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 6. 3.

*Tabulka 6. 3 Výsledné odhady hodnot neznámých a jejich středních chyb*

Název bodu	g [mGal]	Střední chyba g [mGal]	Chod gravimetru [Gal/hod]	Střední chyba chodu gravimetru [Gal/hod]
Nečtiny	980937,832	0,011	0,024	0,025

## 7 ZÁVĚR

Gravimetrie je experimentální disciplínou velmi potřebnou pro řešení problémů v geodézii. Jejím hlavním využitím v geodézii je poskytování dat pro určení přesného tvaru Země. Na základě získaných gravimetrických dat z pozemní, letecké a družicové gravimetrie, je vytvořen globální model geoidu, který slouží pro určení referenčního zemského elipsoidu (tedy geocentrického souřadnicového systému), jako referenční hladina pro nadmořské výšky a pro studium dynamických vlastností Země.

Gravimetrie prošla dlouhým vývojem, na jehož prvopočátku stál Newtonův zákon o gravitační síle. Dlouhá léta se tíže měřila pomocí kyvadel, která až v polovině 20. století byla nahrazena gravimetry. Gravimetry prošly dlouhým obdobím experimentálních pokusů a nepřetržitého vývoje, díky kterému se neustále zvyšovala a stále zvyšuje přesnost jejich měření. Gravimetry se navíc uzpůsobily i pro měření nejen na povrchu Země, ale i například v letadle, ponorce či na lodi. Důležitý vývoj v dnešní době představuje měření tíhového pole Země pomocí družic. Pro budoucnost globálního mapování tíhového pole Země je důležitá realizace nové družice, která by se měla začít provozovat po skončení misí GOCE a GRACE (v roce 2017).

Česká republika má jako hlavní experimentální pracoviště v oblasti gravimetrie Geodetickou observatoř Pecný, kde se měří tíhové zrychlení absolutním a supravodivým gravimetrem. Na tomto pracovišti se též vyvíjejí nové metody testování přesnosti gravimetrických dat včetně rušivých vlivů ovlivňující měření tíže. Výsledky práce tohoto pracoviště přispívají k rozvoji dalších geovědních oborů.

V naší zemi je malé množství studentů zabývajících se tématem gravimetrie, proto cílem této práce bylo mimo jiné stručně a jednoduše přiblížit základní principy této experimentální disciplíny, která je nepostradatelnou součástí tolika vědních oborů.

## Zdroje:

- [1] ALBERTS, Bas. *Regional gravity field modeling using airborne gravimetry data*. Netherlands Geodetic Commission, 2009, 179 s., ISBN: 978-906-1323-129.
- [2] BROŽ, Jaroslav; Zdeněk ŠIMON & Vojtech PÁLINKÁŠ. *Gravimetrická slapová stanice Pecný* [online]. c2010, poslední revize 19. 1. 2010 [cit. 18. 5. 2013]. Dostupné z: <[http://www.vugtk.cz/odis/sborniky/sb2005/Sbornik\\_50\\_let\\_VUGTK/Appendix-Czech\\_Version\\_of\\_Some\\_of\\_the\\_Contributions/30-Broz-Simon-Palinkas.pdf](http://www.vugtk.cz/odis/sborniky/sb2005/Sbornik_50_let_VUGTK/Appendix-Czech_Version_of_Some_of_the_Contributions/30-Broz-Simon-Palinkas.pdf)>.
- [3] CIMBÁLNÍK, Miloš; Antonín ZEMAN & Jan KOSTELECKÝ. *Základy vyšší geodézie*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007, 218 s. ISBN: 978-80-01-03605-1.
- [4] JANÁK, Juraj. *Gravimetria*. Bratislava: Nakladatelství STU, 2010, 131 s. ISBN: 978-80-227-3254-3.
- [5] KLOKOČNÍK, Jaroslav. *Mapování gravitačního pole Země pomocí družice GOCE*. Geodetický a kartografický obzor. 2009, roč. 55(97), č. 8, s. 165 – 174.
- [6] NOVÁK, Pavel. *Geodézie* [online]. Poslední revize 7. 6. 2006 [cit. 21. 5. 2013]. Dostupné z < <http://gis.zcu.cz/studium/gev/geodezie/geodezie.pdf> >.
- [7] OLEJNÍK, Stanislav. *Vývoj gravimetrických základů na území České republiky*. Praha: Zeměměřický úřad, 1997, 31 s.
- [8] ŠIMON, Zdeněk. *Gravimetry LaCoste Romberg*. Geodetický a kartografický obzor. 1995, roč. 41(83), č. 3, s. 52-54.
- [9] ŠŮLA, Jaroslav; František Zemánek. *Matematické fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. Praha: Prometheus, spol. s. r. o. 2006, 3. Vydání, 206 s., ISBN: 80-85849-84-4.
- [10] TORGE, Wolfgang. *Geodesy*. Berlin: Walter de Gruyter, 2001, 416 s., ISBN: 3-11-017072-8.
- [11] VALKO, Miloš; Vojtech PÁLINKÁŠ & Jakub KOSTELECKÝ. *Korekce absolutních tíhových měření z atmosférických vlivů*. Geodetický a kartografický obzor. 2013, roč. 59(101), č. 4, s. 69 – 75.

- [12] VOLAŘÍK, Tomáš. *Korekce tíhových účinků na měření supravodivým gravimetrem* [online]. Poslední revize 20. 1. 2011 [cit. 19. 5. 2013]. Dostupné z: <[http://www.fce.vutbr.cz/veda/JUNIORSTAV2011/pdf/6.1/Volarik\\_Tomas\\_CL.pdf](http://www.fce.vutbr.cz/veda/JUNIORSTAV2011/pdf/6.1/Volarik_Tomas_CL.pdf)>
- [13] VÚGTK, v. v. i. *Výroční zpráva 2012* [online]. Poslední revize 26. 6. 2012 [cit. 10. 5. 2013]. Dostupné z: <[http://geoportal.cuzk.cz/Dokumenty/vyrocní\\_zprava2012.pdf](http://geoportal.cuzk.cz/Dokumenty/vyrocní_zprava2012.pdf)>.
- [14] VYKUTIL, Josef. *Vyšší geodézie*. Praha: Kartografie, n. p. 1982., 544 s. ISBN: 29-620-82.
- [15] The European Space Agency (ESA) [online] Poslední revize 13. 2. 2013 [cit. 28. 5. 2013]. Dostupné z: <http://www.esa.int/> .

## **SEZNAM PŘÍLOH**

**Příloha A** – Hlavní gravimetrická základna Hřensko – Dolní Dvořiště

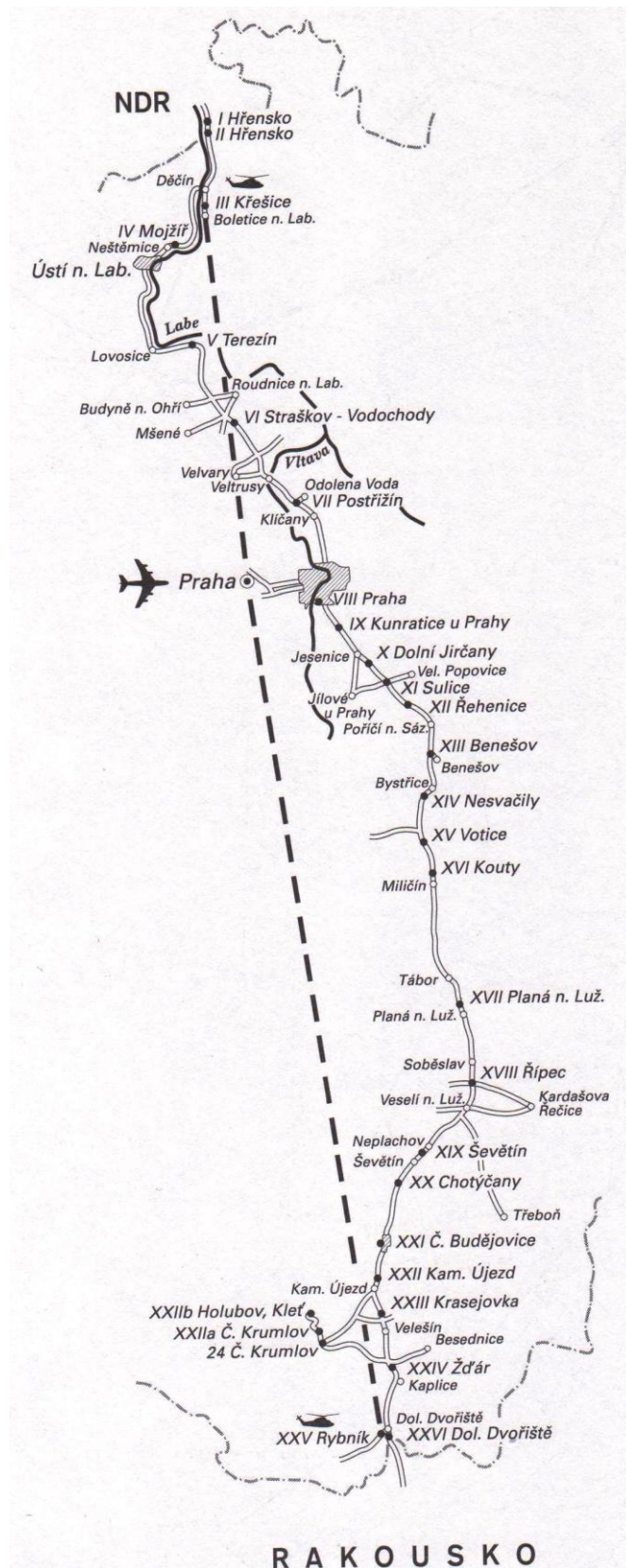
**Příloha B** – Československá základní gravimetrická síť

**Příloha C** – Spojení československé gravimetrické sítě se sítěmi Německa, Polska a Maďarska

**Příloha D** – Ukázka údajů o tíhovém bodu Plzeň

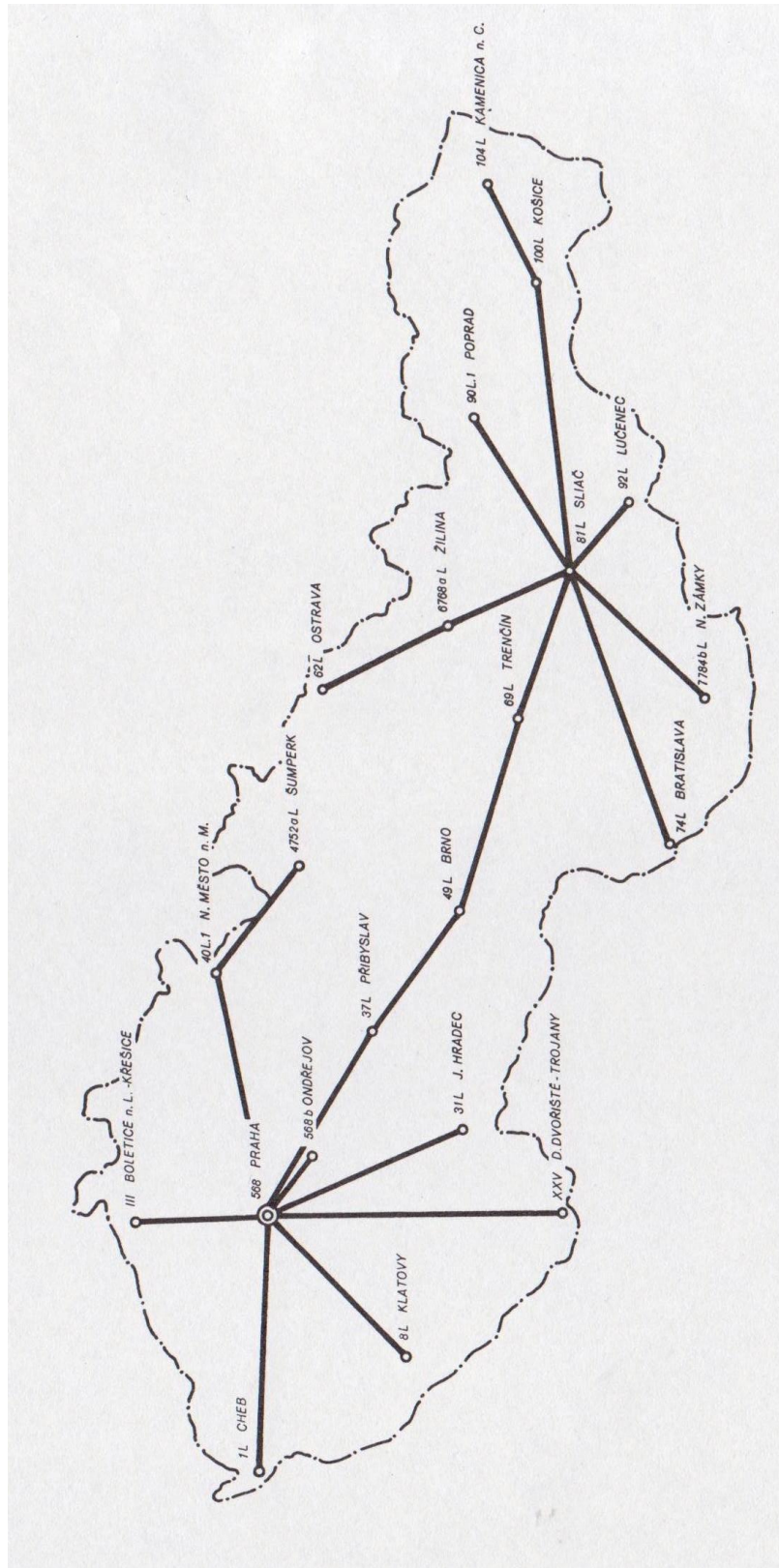


## Příloha A



Zdroj: Olejník, 1997

## Příloha B



Zdroj: Olejník, 1997

Příloha C



Zdroj: Olejník, 1997

## Příloha D

### MÍSTOPIS BODU ZÁKLADNÍHO TÍHOVÉHO BODOVÉHO POLE Místopis tíhového bodu České gravimetrické sítě

<p><b>Tíhový bod: Plzeň</b> Okres: PLZEŇ*MĚSTO Zeměpisná šířka: 49° 44' 16" Zeměpisná délka: 13° 23' 55"</p>	<p><b>Číslo bodu: 3129,01</b> Řád: <b>Bod 1. řádu</b> List mapy: M - 33 - 75 - D H = 331,170 m g = 980970,879 mGal</p>
<p><b>Místopisný popis:</b> Slovany, Habrmannova ulice, v parku před domem č. 43 (školní družina) . <b>Příjezd:</b> od nádraží nejprve Železniční, pak Koterovskou ulicí a na křižovatce ulic Koterovské a Habrmannovy před plaveckým areálem adbočit vlevo. <b>Výškové připojení:</b> HI Kotouň - Plzeň, 64.3 Č, dům čp.475 a 65.1 Č, dům čp. 66 .</p>	
<p><b>Stabilizace:</b> typ I, betonová deska, ochranná tyč 1/2</p>	<p><b>Zřízení značky:</b> Trešl, 1981</p>
<p><b>Místopisný náčrt:</b></p> 	<p><b>Foto:</b></p> 