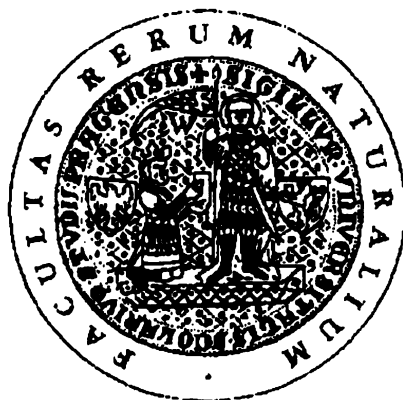


Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta
Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky



Mikrogravimetrický průzkum rotundy sv. Kateřiny ve Znojmě

Bakalářská práce

Marek Spěšný

Vedoucí: RNDr. Jan Mrlina

Praha, srpen 2007

UŽITA GEOFYZIKA
GRAVIMETRIE
MIKROGRAVIMETRIE
ROTUNDA SV. KATEŘINY
VE ZNOJMĚ
HUSTOTNÍ NEHOMOGENITY

Obsah:

1. ÚVOD	3
2. SEZNÁMENÍ S LOKALITOU	3
2.1 HISTORIE	3
2.2 REGIONÁLNÍ GEOLOGIE LOKALITY	5
2.3 PETROLOGIE	6
3. METODIKA PRÁCE	8
3.1 POUŽITÉ METODY	9
3.2 ZVOLENÝ POSTUP PŘI MĚŘENÍ DAT	9
3.3 PŘÍSTROJ (LACOSTE & ROMBERG, MODEL D)	12
3.4 POUŽITÝ SOFTWARE	14
4. ZPRACOVÁNÍ A INTERPRETACE DAT	14
4.1 KOREKCE DAT NA SLAPY A CHOD GRAVIMETRU (DRIFT)	14
4.2 PŘESNOST MĚŘENÝCH DAT	15
4.3 KOREKCE NA TÍHOVÝ ÚČINEK ZDI (GMODEL)	16
4.4 BOUGUEROVY ANOMÁLIE	17
4.5 REZIDUÁLNÍ ANOMÁLIE	19
5. ZÁVĚR	20
POUŽITÉ PODKLADY, SEZNAM LITERATURY	22
SEZNAM OBRÁZKŮ	22
SEZNAM TABULEK	23

Děkuji vedoucímu této bakalářské práce RNDr. Janu Mrlinovi za to, že mi umožnil podílet se na tomto průzkumu, za jeho trpělivé vedení mojí práce a za informace a materiály, které mi ochotně poskytl. Dále chci poděkovat za poskytnuté informace RNDr. Vratislavu Blechovi, CSc. Díky patří také ing. Marii Čejkové z MěÚ Znojmo - odboru školství a Jihomoravskému muzeu ve Znojmě, konkrétně doc. PhDr. Jaromíru Kovárníkovi, Mgr. Jaroslavu Šmerdovi, Jaroslavu Frecerovi.

Za podnětné připomínky týkající se formy textu děkuji také Mgr. Michale Králové a Petru Šestákovi.

1. Úvod

Na základě požadavku MěÚ ve Znojmě jsme v únoru 2007 provedli nezávislé mikrogravimetrické měření ve znojemské rotundě sv. Kateřiny. Cílem tohoto měření bylo zjistit, jestli se pod podlahou uvnitř objektu nenachází hustotní nehomogenity nebo snad volné podzemní prostory (chodby, štoly, hrobky, apd.). Abychom tuto skutečnost zjistili, provedli jsme v rotundě mikrogravimetrické měření a pomocí získaných dat jsme identifikovali anomální hodnoty v tíhových datech a z nich následně vytvořili mapu reziduí. Při posouzení relevance podezření na existenci podzemního objektu jsme z této mapy vycházeli.

I přestože v této lokalitě bylo provedeno již dříve několik geofyzikálních průzkumů, především zemním radarem (Ground Penetration Radar), byl současný mikrogravimetrický průzkum pojat jako nezávislý bez detailní znalosti předešlých naměřených dat. Mikrogravimetrii jako geofyzikální metodu vhodnou pro archeologický výzkum podzemních prostor kvalifikuje např. Mrlina (2001).

V této práci chci lokalitu představit z hlediska historického, regionálně-geologického a petrologického. Dále nastíním teoretický základ gravimetrie, neboť hlavní částí je detailní popis průběhu prací na tomto projektu od zadání úkolu, přes samotné měření až po shrnutí a interpretaci naměřených dat.

2. Seznámení s lokalitou

2.1 Historie

Podle serverů www.znojemskarotunda.com a www.znojmocity.cz je rotunda sv. Kateřiny původně zasvěcena Nanebevzetí Panny Marie a je poslední existující památkou přemyslovského knížecího hradu ve Znojmě.

Po sjednocení českého státu ji založil snad již před rokem 1037 hrad český kníže Břetislav I. Areál hradu Znojmo se stal po zřízení moravských údělů sídlem knížete, současně též správním a církevním střediskem. Podrobný archeologický průzkum v letech 1987-89 potvrdil, že knížecí rotunda s pozdější funkcí velkofarního kostela byla postavena kolem poloviny 11. století.

Po vysazení Znojma na královské město před rokem 1226 Přemyslem Otakarem I. se stává rotunda sv. Kateřiny součástí královského hradu. Ve 14. století patřil její patronát znojemským klariskám, které ji roku 1555 prodaly městu a od té doby rotunda sdílela pohnuté osudy celého hradu. Zprofanovaná hradní rotunda sloužila postupně jako skladiště dřeva, chlév pro vepře, pivnice a tančírna a nakonec jako košíkářská dílna. V polovině 19. století se však ozvaly první hlasy veřejnosti, žádající zachování a odborné restaurování této památky. Od té doby se na jejím restaurování vystřídal mnoho významných akademických malířů a restaurátorů.

Rotunda sv. Kateřiny ve Znojmě

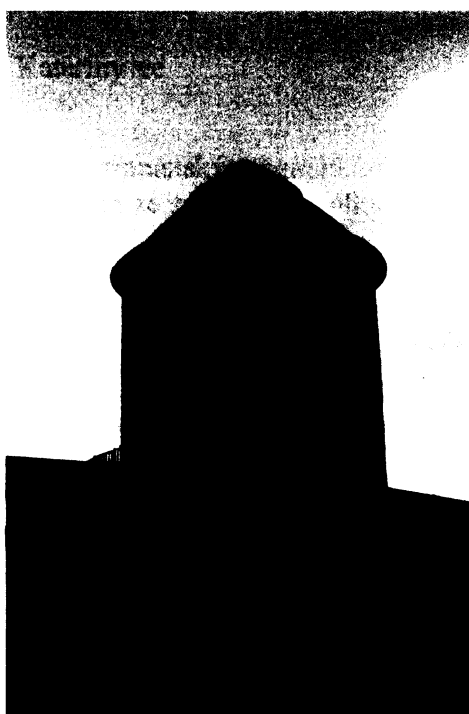
Podle www.znojmskarotunda.com je stavba tvořena válcovitou lodí o průměru 6,79 metrů, k níž se pouhou hranou připojuje podkovovitá, 3,5 metru široká apsida. Kopulí zaklenutá loď je 10,11 metrů vysoká a apsida, sklenutá konchou, dosahuje ve středu triumfálního oblouku výšky 5,9 metrů. Na ose kněžiště je zdivo apsidy prolomeno jedním okénkem s jednoduchou špaletou. Podobná tři další okénka se otevírají v západní, jihojihozápadní a v jihojihovýchodní části stěny válcovité lodi. Na netypické severní straně lodi byl umístěn původní obdélníkový vchod v půlkruhovitě sklenutém portálu s tympanonem, viz obr. 1 a 2.

Zdivo z nepravidelně přitesávaných kvádrů, uložených v řádcích na kvalitní vápennou maltu, dosahuje síly 1,1 metru a je zevně neomítnuté.

Ozdobným kamenným prvkem je hnědočervený pískovec na portálu, okně a římse. Jeho zlomky se objevovaly také pod podlahou rotundy.



Obr. 1 Rotunda sv. Kateřiny ve Znojmě. Jihozápadní pohled.



Obr. 2 Rotunda sv. Kateřiny ve Znojmě. Severozápadní pohled.

Podle www.znojmcity.cz jsou vnitřní stěny rotundy vyzdobeny unikátními románskými malbami (viz obr. 3), jejichž obsah zůstává dosud předmětem odborného výzkumu. Jejich vznik je spojován s rokem 1134. Některé hypotézy předpokládají ještě starší vznik výmalby. Tyto hypotézy jsou však nepodložené a odborná veřejnost je odmítá. Kromě biblických motivů je velká část maleb věnována genealogii českého rodu Přemyslovců s ústřední scénou Povolání Přemysla Oráče na trůn. Následuje portrétní galerie 27 knížat.



Obr. 3 Malířská výzdoba rotundy sv. Kateřiny ve Znojmě.

Rotunda sv. Kateřiny ve Znojmě patří k našim nejvýznamnějším románským památkám. V roce 1962 byla prohlášena za národní kulturní památku a stala se jedním ze symbolů počátku českého státu s hlubokým národně a státně politickým významem.

2.2 Regionální geologie lokality

Podle Kachlíka (nedatováno) v moravské části České republiky zhruba v linii Znojmo – Ostrava se stýkají dvě části Evropy různého stáří, které se liší geologickým vývojem i geofyzikálními parametry zemské kůry. Čechy a část Moravy a Slezska ovlivnil starší variský orogenetický cyklus a východní Moravu a Slezsko mladší cyklus alpínský.

Na západ od této linie mluvíme o Českém masivu, o jednom z nejvýznamnějších a plošně nejrozsáhlejších fragmentů variského orogénu, který vznikl během devonu a karbonu (cca mezi 380 – 320 Ma) kolizí perigondwanských mikrokontinentů (tj. mikrokontinentů situovaných ve starším paleozoiku při severním okraji gondwanské pevniny).

Východní část Moravy a Slezska náleží k orogénu Západních Karpat, který je jednou z dílčích částí alpid – rozsáhlého horského systému jižní Evropy, který vznikl kolizemi kontinentálních fragmentů situovaných mezi severním okrajem Afriky a varisky konsolidovanou západoevropskou epivariskou platformou během mezozoika a terciéru. Na české území zasahuje jen část Západních Karpat, tzv. Vnější Západní Karpaty.

Město Znojmo je situováno mezi těmito dvěma celky: Moravsko – slezskou oblastí Českého masivu a karpatsou předhlubí Vnějších Západních Karpat.

Brunovistulikum

Moravsko – slezská oblast byla původně jednotným blokem, který byl součástí avalonsko – kadomského orogénu při severním okraji gondwanské pevniny. V průběhu kambria došlo k připojení moravsko – slezské oblasti společně s malopolským blokem ke starému jádru Evropy, tzv. východoevropské platformě podél Tornquistovy linie. Variská kolize této jednotky ve spodním karbonu s lugodanubikem (lugikum a moldanubikum) však způsobila, že západní část bloku byla silně varisky přepracována – rozlámána na dílčí bloky a později deformována a metamorfována. Tato část se nazývá moravosilezikum.

Východní část označovaná jako brunovistulikum nebyla od konce kadomské orogeneze žádnou jinou orogenezí výrazněji postižena a je tedy epikadomskou platformní jednotkou, která byla v průběhu variské a alpínské orogeneze deformována převážně jen křehce.

Kadomský podklad vystupuje na větší ploše pouze v brněnském a dyjském masivu. Jeho větší část je skryta pod sedimenty příkrovů Vnějších Západních Karpat, karpatské předhlubně, autochtonních mezozoických a terciálních platformních formací jihovýchodního svahu Českého masivu.

Na naše území v okolí Znojma zasahuje svým severním výběžkem dyjský masiv, kde převládají biotitické granodiority a granity, diority jsou ojedinělé.

Karpatská předhlubeň

Podle Chlupáče et. al. (2002) vznikla v předpolí v terciéru (rozhraní oligocénu a miocénu) právě vyvrásněného pásma Vnějších flyšových Karpat intenzivně klesající karpatská předhlubeň. Karpatská předhlubeň je součástí periferních alpsko – karpatských pánví v předpolí flyšových jednotek. Na jihozápadě se napojuje na molasovou zónu Rakouska, na severovýchodě pokračuje na polské území. Zahrnuje soustavu miocenních pánví, které v souvislosti s postupujícími příkrovy flyšových Karpat přemísťovaly svůj prostor i osu směru do předpolí na prohýbající se okraj Českého masivu, zatěžovaný hmotou příkrovů. Tento prostor byl v miocénu vyplňován převážně mořskými uloženinami. V té době moře pronikalo v depresích a údolích z karpatské předhlubně až do východních Čech a na Moravě zřejmě pokrývalo mnohem větší plochy, než jsou dnes zachované reliktu mořských uloženin.

Mocnost převážně jílovitých a písčitých sedimentů v karpatské předhlubni může přesáhnout i 2 km.

2.3 Petrologie

Ke konci roku 1992 provedl Ing. Lumír Woznica, CSc. (1993) na objednávku Klubu přátel znojemské rotundy pobočky Brno geologický průzkum lokality. Průzkum spočíval v provedení několika mělkých jádrových úzkoprofilových vrtů, z nichž jeden byl dodatečně prohlédnut televizní kamerou přizpůsobenou pro snímání stěn vrtného otvoru.

Projektované vrty zabezpečila společnost TOPGEO spol s r.o. u GEOSERVISu Brno, spol. s r.o. Sondy byly odvrtny 10. listopadu 1992 lehkou přenosnou soupravou typu CEDIMA na elektrický pohon pracovníky GEOSERVISu Brno ing. F. Wronkou a ing. M. Červinkou.

Vrtalo se jádrově diamantovou korunkou o průměru 46 mm, resp. 60 mm s vodním výplachem. Technologická voda se přiváděla z blízké sudárny pivovaru a od vrtu se odváděla žlábkem jihovýchodním směrem mimo rotundu. Spotřeba výplachové vody byla malá.

Vrty V2, V3 a V4 byly provedeny z vnějšího líce apsidy. Vrty V2 a V3 jsou subhorizontální, tj. odkloněny od vodorovné roviny jen o 8° a 6°. Vrt V3 svírá s horizontálou úhel 39°. Svislý vrt V5 byl odsazen od líce zdi 0,5 m. Nebyl dokončen, protože užitá vrtná souprava je určena především pro stavebně technické práce a na hloubení vrtu v tvrdé rozpukané hornině je bez možnosti zapření příliš lehká. Vrt V5 byl proto odstaven v 0,5 m a od dalšího projektovaného svislého vrtu V1 se ustoupilo.

Zhodnocení průzkumných prací

Všechny vrty V2, V3 a V4 nejprve prošly odsazeným zděným límcem okolo zdi apsidy a dále do hloubky asi 0,1 m až 0,15 m pokračovaly v aplitické hornině. Jak vyplývá z videozáznamu z vrtu V4 je ochranné zdivo límce bezprostředně osazeno na skalní podklad tvořený převážně aplitem. Malta je zvláště dobře patrna z bočního záběru televizní kamery při horní stěně vrtu. Má struskovitý charakter.

Aplitická hornina tvořící v daném místě výraznou žílu není petrologicky ani mechanicky homogenní. Ve vrtné drti, v níž převažovaly úlomky narůžovělého aplitu, byly obsaženy i zbytky rozvrtných žilek pegmatitu a křemene. K pegmatitu lze řadit i odlišný typ horniny v záběru horní stěny vrtu v hloubce 0,7 m, kde pegmatit přechází do leukokratního granitoidu charakterizovaného skvrnitým projevem snímané stěny. Naprostou převahu aplitu dokumentují jak získané geologické vzorky, tak i bělavé stěny vrtu na videozáznamu.

Aplit není celistvý. Je nepravidelně a místy hustě rozpukán. V horní stěně vrtu bylo pozorováno jeho břidličnaté stlačení. Na téže stěně vrtu je v 0,53 m puklina provázena drcenou horninou ve spáře mocné 1 cm až 2 cm. Při interpretaci kamerových snímků nutno pamatovat, že podaný obraz má asi 3,7 násobné zvětšení. Rozpukání podmiňuje i opad úlomků horniny ze stěny vrtu (např. hloubka 0,45 m). Pukliny jsou často zející a otevřeny v mm jako důsledek přípovrchové polohy aplitu, který nese stopy navětrání ve více či méně souvislých povlacích limonitu na puklinách. Ve smyslu ČSN 721 001 je hornina exogenními procesy částečně alterována.

Uvedený mechanický stav skalního podkladu byl hlavní příčinou nízkého výnosu jádra z vrtu V3, V4 i V5, v nichž dosáhl jen 30%, 37% a 32%. Zbytek horniny byl z vrtu vynesena výplachovou vodou jako vrtná nevápnitá měl. Výplachová voda byla mléčně zakalená z rozvrtných nevětrálých živců. Soustavné sledování času vrtání, postupu vrtání a návratnosti technologické vody vylučuje ve všech vrtech přítomnost dutin v provrtaném místě. Při mocnosti obvodové zdi apsidy 1,2 m zasáhly vrty do horninového masivu pod polovinou základové spáry zdi a více.

Z výsledků vrtů V2, V3 a V4 vyplývá, že základová spára obvodového zdiva apsidy při jeho líci musí být v sondovaném úseku výše než úroveň ústí vrtu, tj. nad kótou cca 297,0 m n.m. To není v rozporu s ověřeným průběhem základové spáry uvnitř apsidy, kde ve srovnatelném místě se pohybovala v absolutní výšce od 297,33 m n.m. do 297,55 m n.m. Znamená to, což potvrzuje i výchoz aplitu v místě navázání apsidy na hlavní loď rotundy, že rotunda je v tomto úseku založena nad dnešním terénem a že její základová spára je kryta patrně později přizděným ochranným kamenným límcem. Apsida je v tomto místě nazděna na kamýk aplitické žíly, která vystupovala pro svoji odolnost nad okolní zvětralé granitoidy dyjského masivu.

3. Metodika práce

Podle Gruntoráda et. al.(1985) je základem gravimetrie měření zemského tíhového pole. Tíhové pole Země ovlivňuje řadu jevů probíhajících v zemském tělese a jeho okolí. Působí nejen na tuhá tělesa, ale i na kapaliny a plyny. Tíhové pole ovlivňuje tepelné proudění v atmosféře, tj. stoupání lehčího ohřátého vzduchu a klesání těžšího chladného. K tomuto jevu dochází i ve vodních nádržích. Tepelné proudění a gravitační diferenciaci lze předpokládat i v zemském nitru, v němž se podle seismologů vyskytují plastické hmoty schopné pomalého proudění.

V gravimetrii zkoumáme průběh tíhového pole s cílem určit rozložení hustotních nehomogenit v zemském (nitru) tělese. Tyto nehomogenity mohou mít rozměry globální, kontinentální, regionální a lokální.

Fyzikální základ gravimetrie vychází z faktu, že v okolí každého tělesa existuje gravitační pole. Jestliže do gravitačního pole Země o hmotnosti M_z vložíme jiné těleso o hmotnosti m , můžeme podle Newtonova zákona napsat:

$$F_g = \kappa \cdot (M_z \cdot m / R_z^2),$$

kde

F_g gravitační síla působící na těleso na povrchu Země [N],

κ gravitační konstanta ($6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$),

M_z ... hmotnost Země [kg],

m hmotnost tělesa na jejím povrchu [kg],

R_z poloměr Země (za předpokladu kulového tvaru) [m].

Kromě síly gravitační působí na tělesa na povrchu Země síla setrvačná F_s , vyvolaná otáčivým pohybem Země kolem osy:

$$F_s = m \cdot \omega^2 \cdot R_z \cdot \cos \varphi,$$

kde

ω ... úhlová rychlost rotace,

φ ... zeměpisná šířka,

Výslednicí gravitační síly F_g a setrvačné síly F_s je tíhová síla G . Směr tíhové síly se nazývá svislý. Síla G uděluje volnému tělesu zrychlení volného pádu, které se nazývá zemské tíhové zrychlení g , resp. zemská tíže.

$$G = m \cdot g$$

Tíhové zrychlení g ($g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$) je základní veličinou sledovanou v gravimetrii.

V gravimetrii nás nejvíce zajímají tzv. tíhové anomálie, které jsou projevem hustotních nehomogenit regionálního nebo lokálního měřítka. Ve srovnání s celkovou hodnotou tíhového pole (asi 10^6 mGal) se změnami závisujícími na zeměpisné šířce ($5,2 \cdot 10^3$ mGal) je projev hustotních nehomogenit v geologické stavbě velmi malý (od 10^{-3} mGal do 10 až 10^2 mGal).

Abychom mohli získat tíhové anomálie související s geologickou stavbou Země, musíme uvážit závislost zemské tíže na několika faktorech. Hlavními jsou nadmořská výška a zeměpisná šířka, ale rovněž hustota hornin svrchní části zemské kůry. Jejich vliv kompenzujeme výpočtem tzv. „úplné Bouguerovy anomálie“ podle následujícího vztahu:

$$\Delta g = g - g_n + (3,083 - 0,419\rho) h + \Delta g_t - B \quad [\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-2}],$$

kde

Δg tíhová anomálie

g naměřená tíže

g_n normální tíže

3,083h oprava z volného vzduchu (Fayeova oprava)

0,419 ρ h ... oprava z Bouguerovy desky

Δg_t terénní korekce

B Bullardův člen.

3.1 Použité metody

Gravimetrie je geofyzikální metoda, která využívá přirozené potenciální pole Země, v tomto případě gravitační pole Země. Pomocí této metody jsme schopni odhalit absenci hmoty nebo hustotní nehomogeniny pod úrovní terénu.

Pro řešení daného problému jsme použili metodu velmi přesného měření relativního tíhového zrychlení v tíhovém poli Země, tzv. mikrogravimetrii.

Mikrogravimetrický průzkum se od běžné detailní gravimetrie liší především tím, že síť měřických bodů je hustší (body jsou od sebe vzdáleny v prvních metrech) a požadovaná přesnost vyšší (zpravidla do 3-7 mikroGal).

V gravimetrii se většinou používají odvozené jednotky tíhového zrychlení:

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

$$1 \text{ miliGal} = 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$$

$$1 \text{ mikroGal} = 10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$$

Pokud pracujeme v soustavě SI, používá se jednotka $1 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ [= 0.1 mGal]

Pro objemovou hmotnost :

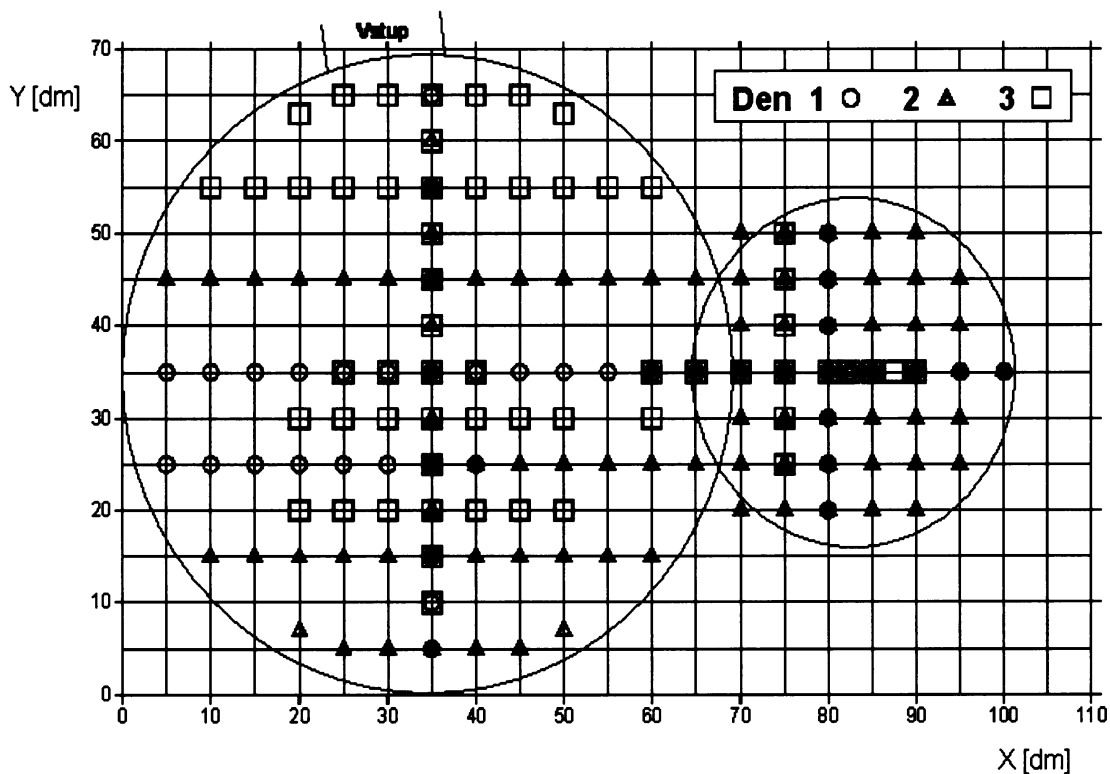
$$1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3} = 1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

3.2 Zvolený postup při měření dat

1. den (1. února 2007)

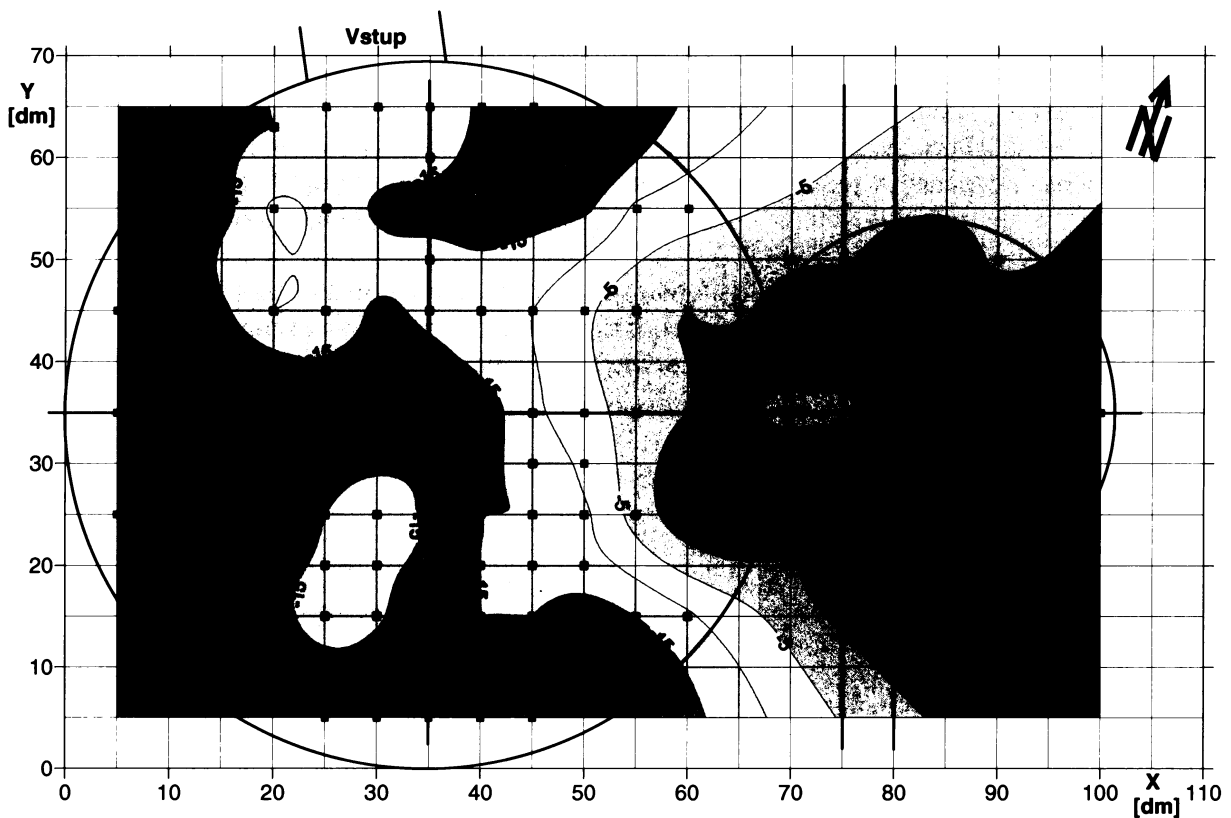
- Nejprve jsme na podlaze rotundy vyznačili pozici měřických bodů (viz obr. 4). Pro tento účel jsme použili lepicí pásku. Využili jsme osové symetrie rotundy a osu X jsme vedli rovnoběžně s její podélnou osou při okraji vnitřní strany zdi rotundy proti jejímu vstupu.

Osu Y jsme situovali kolmo na X tak, aby centrální bod hlavní lodi měl souřadnice [35, 35] (metráž je z technických důvodů uváděna v dm).



Obr. 4. Pozice měřících bodů v rotundě, Mrlina (2007). Tvar vnitřní zdi je zjednodušen aproximací pomocí dvou kruhů, jež se odchyluje od skutečnosti v místě jejich napojení v metráži 65-75. Metráž je z technických důvodů uváděna v dm. Některé části profilů byly zaměřeny i třikrát nezávisle.

- Během dne jsme změřili 41 bodů.
- Na závěr jsme provedli tzv. technickou nivelaci, tzn. změřili jsme relativní výšky měřených bodů pomocí nivelačního přístroje Zeiss Ni 025. Výsledek tohoto měření popisuje mapa relativních výšek podlahy v rotundě (viz obr. 5).



Obr. 5. Mapa relativních výšek podlahy (dlažby) v rotundě naznačuje mírné stoupání ve směru do apsidy (k VSV). Zajímavý je lokální pokles na 35/70-75, Mrlina (2007).

2. den (6. února 2007)

- Druhý den měření jsme navázali na den předchozí. Měřili jsme na 89 bodech.

3. den (7. února 2007)

- Třetí a poslední den měření jsme provedli měření na 58 bodech.

V průběhu každého dne měření jsme často prováděli opakovaná měření, ze kterých jsme definovali chod přístroje (viz 4.1 Korekce dat na slapy a chod gravimetru).

Celkem bylo měřeno 137 bodů a některé jako kontrolní opakovaně v různých dnech:

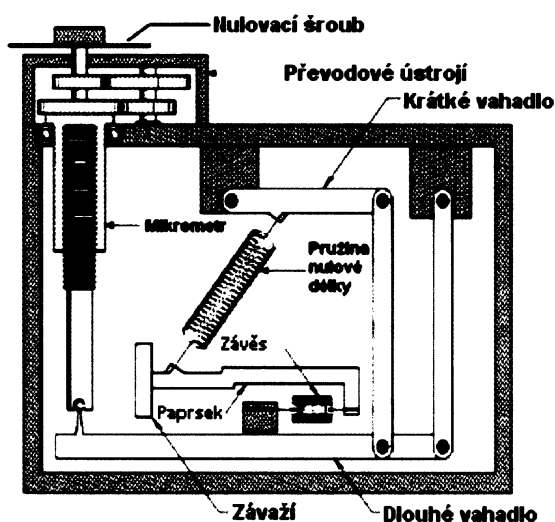
- 1 x 99 bodů = 99 měření
- 2 x 25 bodů = 50 měření
- 3 x 13 bodů = 39 měření

Celkem jsme tedy provedli 188 měření na 137 bodech.

3.3 Přístroj (LaCoste & Romberg, model D)

Gravimetr je přístroj, který slouží k přesnému relativnímu měření tíže. Pro naše mikrogravimetrická měření jsme použili gravimetr LaCoste & Romberg model D (viz obr. 6, 7 a 8). V tomto gravimetru je kovový měřicí systém s vahadlem otočným kolem vodorovné osy a soustava pružin (viz obr. 6).

Protože je měřicí soustava gravimetru citlivá na změnu teploty, je přístroj permanentně připojený na akumulátor. Tento akumulátor napájí termostat, který uchovává měřicí systém gravimetru při konstantní teplotě 53,9 °C (teplota je stanovena pro tento konkrétní typ gravimetru).



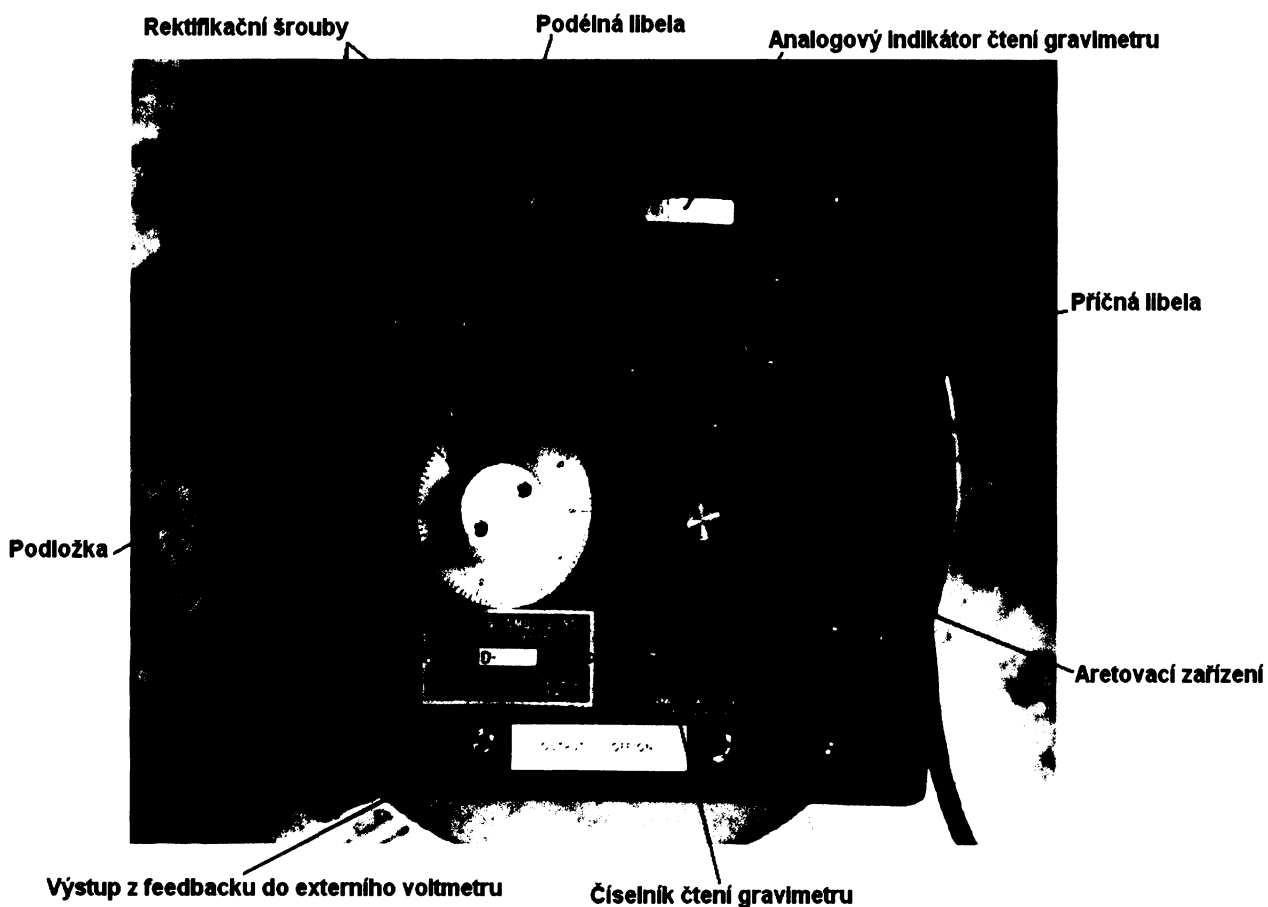
Obr. 6 Schéma gravimetru LaCoste & Romberg, <http://html.rincondelvago.com/files/4/8/1/000164815.png>, (2007).



Obr. 7 Gravimetr LaCoste & Romberg, model D. Celkový pohled.

Feedback:

Zařízení, které při měření elektrostaticky vrací vahadlo do nulové polohy. Na připojeném voltmetru odečítáme hodnotu napětí potřebné na provedení tohoto úkonu. Toto napětí jsme schopni převést pomocí kalibračního koeficientu na tíhové jednotky.



Obr. 8 Gravimetr LaCoste & Romberg, model D. Pohled ze shora – plocha s ovládacími prvky.

Měření přístrojem:

Na měřený bod jsme postavili podložku. Vzhledem k tomu, že podlaha rotundy byla téměř vodorovná, odpadla nám práce s ustavením podložky pomocí krabicové libely. Opatrně jsme vyjmuli gravimetr z kovového transportního kufru a postavili jej na podložku. Při manipulaci s přístrojem je nutné myslet na to, že je velmi citlivý na otřesy, proto operátor musí být při práci s ním velmi pečlivý.

Tento typ gravimetru má pružinu nulové délky kovovou. Proto je, na rozdíl od přístrojů s pružinou křemennou, citlivý na rázy. Jeho nesporná výhoda je ta, že má vysokou přesnost a jeho kvalita roste s jeho stářím, neboť v kovovém měřicím systému se postupně uvolní všechna napětí materiálu.

Jemným pojezdem přístroje po podložce jsme docílili hrubého ustavení. Následné jemné ustavení jsme provedli pomocí podélné a příčné libely a tří stavěcích šroubů. Příčnou libelu jsme vystředili dvěma šrouby na levé straně ovládací platformy gravimetru a poté podélnou libelu pravým stavěcí šroubem.

Jakmile byl přístroj ustaven do vodorovné roviny, uvolněním aretačního zařízení jsme jej uvedli do chodu. Protože jsme se pohybovali na malé ploše, kde rozptyl tíhových hodnot byl malý, čtení gravimetru jsme prováděli pouze na výstupu z feedbacku. Hodnotu číselníku čtení gravimetru jsme nechali konstantní. Po uvolnění aretačního zařízení bylo třeba počkat, než se měřící zařízení ustálilo, což indikuje jednak analogový indikátor čtení gravimetru a jednak hodnoty čtení na výstupu z feedbacku (po ustálení se již nějak dramaticky nemění). Po ustálení přístroje jsme odečetli hodnotu čtení na výstupu z feedbacku, jimž je voltmetr. Protože byla výška podložky konstantní, nemuseli jsme ji měřit a následně ji uvažovat při zpracování dat. Po přečtení hodnoty čtení jsme přístroj zaaretovali a opatrně vložili zpět do kufru. Tento postup jsme opakovali na všech měřících bodech.

Zaznamenávali jsme: číslo bodu, datum, čas, čtení.

3.4 Použitý software

Ke zpracování výsledků jsme použili tento software:

- **Excel (Microsoft):** pro počítání v tabulkovém procesoru.
- **Drift (Mrlina J., Zabadal S.):** pro převod čtení gravimetru na tíhové hodnoty opraveny o slapové efekty a chod přístroje.
- **GMODEL (LaCoste & Romberg Co.):** pro korekci na zeď.
- **Grafer Six (Golden Software Inc.):** na vytváření křivky průběhu relativní tíže v profilech rotundy.
- **Surfer (Golden Software Inc.):** na vytváření map.

4. Zpracování a interpretace dat

4.1 Korekce dat na slapy a chod gravimetru (Drift)

Měřená data jsme nejprve pomocí programu Drift (Mrlina J., Zabadal S.) opravili na slapové efekty a chod gravimetru. Slapové efekty jsou vyvolány pohybem kosmických těles (především Měsíce) kolem Země a pohybem Země kolem Slunce. Tato tělesa ovlivňují tíhové pole Země, a proto jsme s nimi museli počítat a odfiltrovat jejich účinek. Chod gravimetru je jev vyvolaný vlivy, které působí na mechanický systém přístroje. Jsou to především klimatické vlivy (změna okolní teploty a atmosférického tlaku, změna vlhkosti, atd.), drobné otřesy v důsledku manipulace s přístrojem, délka doby od započetí práce v měřickém dnu, atd.

Průběh křivky chodu přístroje jsme zjistili pomocí měření na tzv. opakovaných bodech. Hodnoty chodu jsme z měřených dat odstranili.

Opakované body jsou takové body měření, které jsme během jednoho měřického dne opakovaně změřili a tím jsme zjistili vývojový trend chodu přístroje. V našem případě byl chod přístroje velmi dobře definován, měl téměř lineární průběh. Příčinou toho byly především stabilní klimatické podmínky, pevná dlažba na podlaze rotundy a pravidelná manipulace s přístrojem.

Zvolili jsme si referenční bod, v našem případě to byl bod 82,5 ve středu apsidy rotundy na centrálním profilu č. 35. Z tohoto bodu jsme v jednotlivých dnech měření vycházeli a zároveň jsme na něm i končili. Protože tento referenční bod byl zároveň opakovaný, vraceli jsme se k němu i v průběhu dne. Při zpracování dat jsme tomuto bodu přiřadili relativní hodnotu tíže 500 mikroGal a software Drift ostatní body na tento navázal a vypočítal v nich relativní hodnoty tíže vůči našemu referenčnímu bodu. Hodnotu 500 mikroGal jsme zvolili náhodně, jediný požadavek byl ten, aby nám všechny hodnoty vyšly kladné a my jsme si tak ulehčili zpracování dat o počítání se zápornými hodnotami.

Software automaticky vynásobil hodnoty získané z feedbacku a přečtené na voltmetru kalibračním koeficientem. Tím byly získány hodnoty relativní tíže pro všechny měřené body.

4.2 Přesnost měřených dat

Přesnost měřených dat jsme zjistili pomocí výpočtu statistické chyby měření. Postup byl následující:

1. V programu Excel jsme do tabulky zadali relativní tíže kontrolních bodů získané během tří dnů měření. Některé body byly změřeny dvakrát a některé třikrát. Tyto hodnoty jsme již opravili o slapové efekty a chod přístroje a navázali je na referenční bod. (viz 4.1 Korekce dat na slapy a chod gravimetru).

R1, R2, R3 ... měření ze tří dnů

2. Pro jednotlivé body jsme spočítali aritmetický průměr (buď ze dvou nebo ze tří hodnot).

$$\text{aver} = (R1 + R2) / 2 \text{ nebo } \text{aver} = (R1 + R2 + R3) / 3$$

3. Od jednotlivých měření jsme tento průměr odečetli a rozdíl pak umocnili na druhou. Takto jsme dostali kvadrát odchylek měření pro jednotlivé dny na kontrolních bodech.

$$(R1 - \text{aver})^2; (R2 - \text{aver})^2; (R3 - \text{aver})^2$$

4. Tento kvadrát odchylek jsme sečetli a dostali jsme sumu kvadrátu odchylek pro jednotlivé dny měření a současně pro všechny dny dohromady.

$$\text{suma kvadrát odchylek} = \Sigma(R1 - \text{aver})^2 + \Sigma(R2 - \text{aver})^2 + \Sigma(R3 - \text{aver})^2$$

5. Spočítali jsme počet měření na kontrolních bodech pro jednotlivé dny a tyto hodnoty sečetli.

$$n_1 = 38; n_2 = 38; n_3 = 13$$

$$\Sigma(n_1, n_2, n_3) = 89$$

6. Od celkového počtu měření na kontrolních bodech $\Sigma(n_1, n_2, n_3)$ jsme odečetli počet kontrolních bodů. Tím jsme získali počet kontrolních měření.

$$n = \Sigma(n_1, n_2, n_3) - \gamma \Rightarrow n = 51$$

7. Vypočítali jsme odmocninu z podílu sumy kvadrátů odchylek s počtem kontrolních měření.

$$sd = \sqrt{(\text{Suma kvadrát odchylek} / \Sigma(n_1, n_2, n_3) - \gamma)} \Rightarrow sd = 0,002506 \text{ miliGal}$$

Tab. 1 Výpočet statistické chyby:

				$\Sigma(R1 - \text{aver})^2$	$\Sigma(R2 - \text{aver})^2$	$\Sigma(R3 - \text{aver})^2$
				0,0001252	0,00015	4,55178E-05
		n =	38		38	13
Suma kvadrát odchylek				0,0003203		
		$\Sigma(n_1, n_2, n_3)$	89			
		$\Sigma(n_1, n_2, n_3) - \gamma$	89 - 38	51		
		sd =		0,002506		
				2.5 microGal		

Statistická chyba měření mám vyšla asi 2,5 mikroGal (viz tab. 1) tzn., že měření byla velmi přesná a má smysl se jimi dále zabývat a pokusit se o jejich zpracování a interpretaci. Docílit takové přesnosti nám umožnily velmi dobré podmínky, které při měření panovaly.

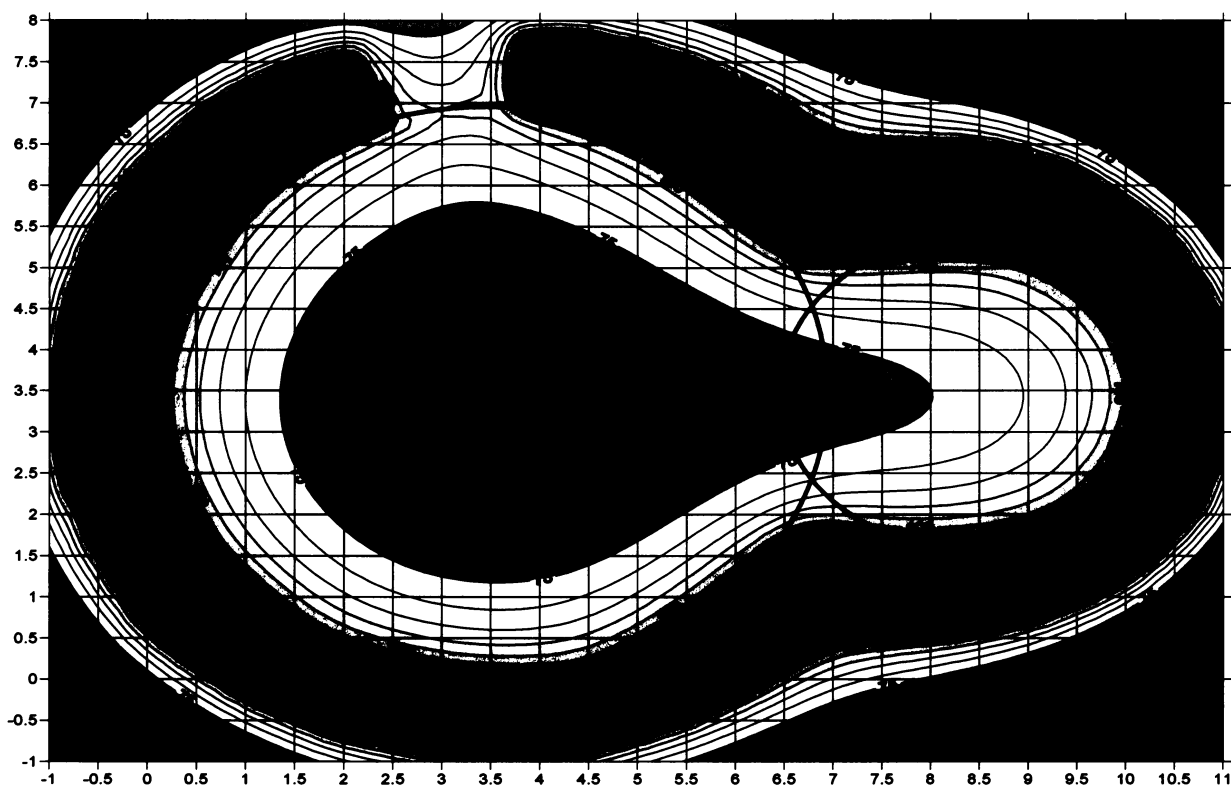
4.3 Korekce na tíhový účinek zdi (GMODEL)

Další důležitou korekcí je oprava na rušivé hmoty. Touto hmotou je pro nás mohutná zeď rotundy. Tíhový účinek zdi sečteme s hodnotou tíže opravenou o slapy a chod přístroje a získáme tíhové hodnoty opravené rovněž o tíhový účinek zdi.

Pro získání hodnot korekcí na tíhový účinek zdi rotundy jsme použili program GMODEL firmy LaCoste & Romberg Co. Postup při výpočtu byl následující. Nejprve jsme v programu vytvořili model rotundy tak, že jsme vnější a vnitřní rozhraní zdi aproximovali vertikálním polygonem. Tento polygon jsme definovali souborem bodů o souřadnicích XY v naší lokální souřadnicové soustavě. Platí, že čím více bodů polygonu, tím vyšší přesnost korekce. V dalším kroku jsme do programu zadali výšky polygonu, což byla výška zdi lodi rotundy 9 m a výška apsidy 6 m.

Dále jsme zadali hustotu zdiva jako vážený průměr granitového zdiva a pojiva 2,5 g.cm⁻³. Následujícím krokem bylo zadání souřadnic vypočtených bodů nebo gridu se zvolenou velikostí buňky. Z gridu jsme v programu Surfer vykreslili mapu korekcí na tíhový účinek zdi rotundy, která je prezentována na obr. 9. Díky aproximaci vnější a vnitřní stěny vertikálním polygonem není tíhový účinek zdi dokonalý, ale pro naše záměry plně dostačující.

Nejmenší vliv měla stavba na body ve středu lodi rotundy a největší v místě napojení apsidy na loď rotundy.



Obr. 9 Mapa korekcí na kruhové zdi rotundy (hodnoty v mikroGal), Mrlina (2007). Ve výpočetním modelu byly kruhy nahrazeny vertikálními polygony s výškou 10 a 6 metrů.

4.4 Bouguerovy anomálie

Posledním krokem zpracování dat byl výpočet Bouguerových anomálií. Vycházeli jsme ze vzorce pro výpočet úplných Bouguerových anomálií (viz 3. Metodika práce). Vzhledem k velmi malé rozloze měřené plochy jsme mohli vypustit člen g_n (tíže normálního pole, resp. korekce na zeměpisnou šířku) a B (Bullardův člen). Vzorec pro výpočet Bouguerových anomálií je tedy následující:

$$BA_{TC_{zed}} = G_{TC_{zed}} + (0,3083 - 0,0419\rho)h,$$

kde

$BA_{TC_{zed}}$ Bouguerova anomálie měřené tíže s korekcí na zeď [mGal]

$G_{TC_{zed}}$ měřená tíže s korekcí na zeď [mGal]

ρ objemová hmotnost přívrchových hornin a hmot [g .cm⁻³]

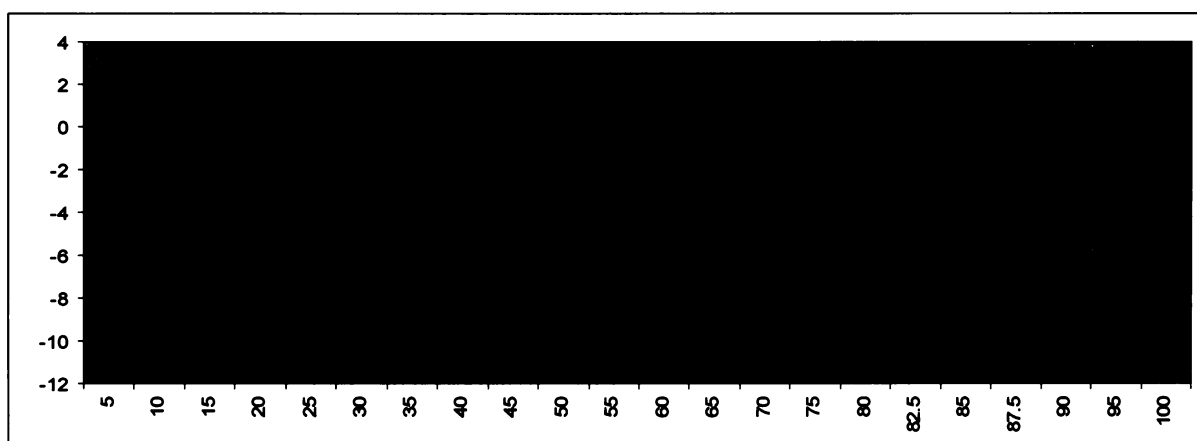
h relativní výška [m].

Po dosazení za $\rho = 2,5 \text{ g .cm}^{-3}$ jsme mohli zjednodušeně psát:

$$BA_{TC_{zed}} = G_{TC_{zed}} + 0,2 h.$$

Pro snazší odečtení hodnot reziduí jsme od všech hodnot vypočtené Bouguerovy anomálie odečetli konstantní hodnotu takovou, abychom se s hodnotami „pohybovali“ kolem nuly. Z těchto hodnot jsme následně v Graferu vynesli jednotlivé měřené profily.

Proložení polynomiální křivky vnesenými hodnotami Bouguerových anomálií byl první interpretační krok, který jsme provedli. Na obrázku č. 10 vidíme profil $Y = 35$ s vyznačenými hodnotami a s aproximační křivkou. Aproximace polynomem n -tého stupně provedená „matematicky“ v programu Grafer, nevyhovovala našim potřebám, protože program vede křivku striktně mezi sousedními body tak, aby co nejlépe vystihl jejich průběh podle metody nejmenších čtverců, případně podle jiné metody. S ohledem na průběh změřených dat, jejich přesnost a znalost okolního terénu, jsme se proto rozhodli aproximaci provést „graficky“. Po aproximaci grafu trendovou křivkou se ukázalo, že většina anomálií bude záporná.

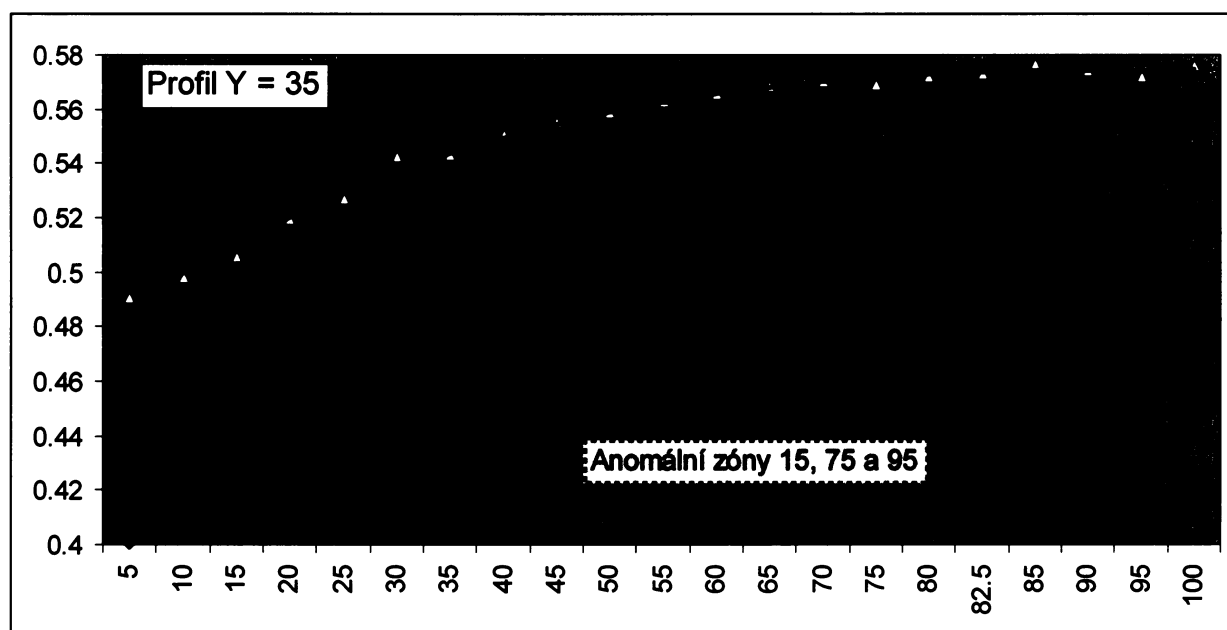


Obr. 10 Profil $Y = 35$: Křivka Bouguerovy tíhové anomálie (po korekci na relativní nadmořskou výšku), Mrlina (2007). Detailní zobrazení s hodnotami v mikroGal.

Pro ilustraci uvádím průběh naměřených hodnot tíže a jejich aproximaci (černá linie) centrálního profilu rotundy $Y = 35$ z naměřených hodnot před korekcí na zdivo rotundy a po ní (viz obr. 11). Tento profil se zdál z hlediska průběhu získaných hodnot tíže nejnadějnější na nehomogenity či chybějící hmotu. Průběh dat po korekci na zeď rotundy (červený graf) se stal plynulejší a celá linie se „zploštila“ a „vyhladila“. Po proložení hodnot trendovou křivkou jsme identifikovali anomální místa, i když jak můžeme vidět, tato místa byla patrná již před korekcí dat na zeď rotundy (modrý graf).

Vliv topografie okolního terénu zdařile ilustruje průběh obou grafů z obrázku 11. Jejich klesající trend k levé straně grafu je způsoben chybějící hmotou okolo této části rotundy. Z obrázku 1 a 2 lze získat dobrou představu o okolním terénu rotundy. V případě, že bychom po všech doposud provedených korekcích, tzn. po korekci naměřených dat na zeď rotundy a relativní nadmořskou výšku, provedli ještě korekci na okolní terén, graf průběhu takto získaných hodnot by se

pravděpodobně zcela vyrovnan (neklesal by ke stranám grafu). Naším cílem bylo však identifikovat a vyčíslit relativní anomální hodnoty v tíhových datech což jsme schopni učinit i bez korekce na terén.

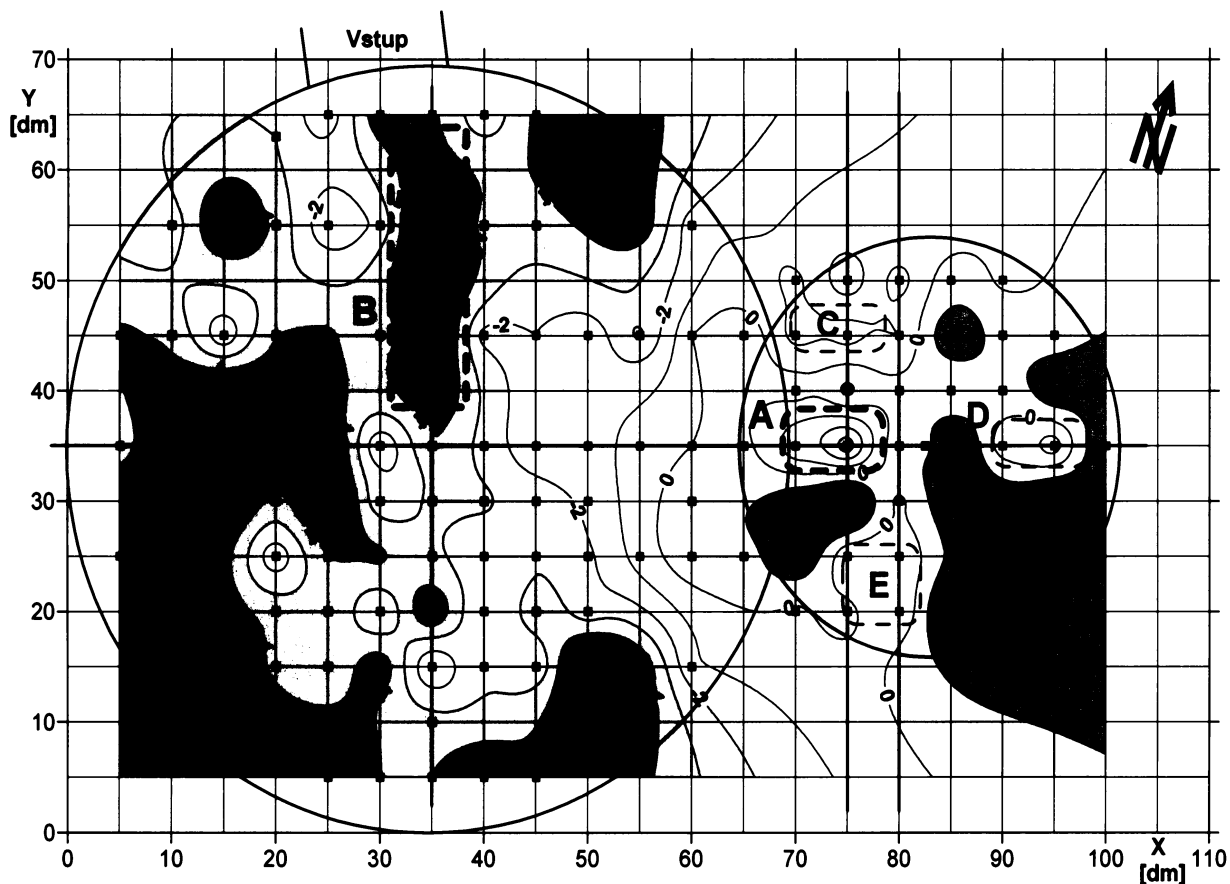


Obr. 11 Profil Y = 35: Křivka měřené tíže po základním zpracování (modrá) a po výpočtu (červená), hodnoty v mGal, Mrlina (2007). Na křivkách jsou vyznačeny tři relativně anomální úseky, amplitudy anomálií jsou však velmi malé. Pro jasnější určení anomálních úseků je proložena polynomiální linie (černá).

4.5 Reziduální anomálie

Jako další interpretační krok jsme z grafů naměřených tíhových hodnot odečetli hodnoty reziduálních anomálií. Tento krok jsme vykonali z dat Bouguerových tíhových anomálií opravených o korekci na relativní nadmořskou výšku.

Z takto získaných hodnot reziduálních anomálií jsme v programu Surfer vytvořili mapu reziduálních anomálií.



Obr. 12 Mapa reziduálních anomálií s korekcí na výšku a zdivo, Mrlina (2007).

Z celkového trendu dat (zvyšování hodnot směrem do apsidy) na obrázku 13 je patrný vliv výšky, relativní charakter anomálií zůstal v podstatě zachován, s lokálními změnami např. u anomálie A 35/70-75, kde po korekci na výšku došlo ke zvětšení amplitudy anomálie na 4 mikroGal.

5. Závěr

Ve znojenské rotundě jsme realizovali mikrogravimetrická měření s cílem zjištění indikací podzemních historických prostor (hrobky). V průběhu tří měřických dnů jsme na lokalitě provedli 188 měření na 137 bodech v síti 50 nebo 100 cm. Tyto body jsme zaměřili technickou nivelací a zjistili tak jejich relativní nadmořskou výšku. Při zpracování získaných dat jsme dali přednost bodům, které byly naměřeny kontinuálně v jednom profilu během téhož dne. Jejich aritmetický průměr z několika dnů měření by s ohledem na chod přístroje mohl vést k falešným anomáliím. Provedli jsme korekci dat na chod přístroje a slapové efekty, na tíhový účinek zdi rotundy a vypočítali jsme Bouguerovy anomálie. Z Bouguerových anomálií jsme vytvořili profily a graficky je aproximovali na normální pole. V jednotlivých profilech jsme odečetli reziduální anomálie a z nich vytvořili mapu reziduí.

Provedené mikrogravimetrické měření je výjimečné kvality díky souhře řady faktorů. Proto bylo možno identifikovat několik anomálií s velmi nízkými amplitudami pod 5 mikroGal. S ohledem na kontrolní měření a zjištěnou přesnost je lze pokládat za reálné.

Nelze však jednoznačně vyhodnotit zdroj anomálií, kterým mohou být nehomogenity podloží, ale i podzemní dutiny. Testovací modelování ukázalo, že např. anomálii A poblíž středu apsidy lze vysvětlit i dutinou cca 0.8 m³ v hloubce 1 m. Podobně je tomu u anomálie B směřující od vchodu do středu rotundy.

Doporučujeme proto ověření mikrogravimetrických anomálií dalšími technickými pracemi.

Rotunda je stále předmětem archeologického průzkumu.

Praha, srpen 2007
Marek Spěšný

.....

Použité podklady, seznam literatury

- Gruntorád J. et. al. (1985): Principy metod užitých geofyziky. SNTL, Praha, 192 str., (34-49), ISBN 04-407-85.
- Chlupáč I., Brzobohatý R., Kovanda J., Stráník Z. (2002): Geologická minulost České republiky. Academia, Praha, 436 str., (346-353), ISBN 80-200-0914-0.
- Kachlík V. (nedatováno): Geologický vývoj území České republiky. MS, SÚRAO Praha, Praha, 64 str.
- Mrlina, J. (2001): Microgravimetry in archaeological investigations. In Service to Archaeology III., Brno, 137-143.
- Mrlina, J. (2007): Mikrogravimetrický výzkum ve znojemské rotundě. MS, GFÚ AVČR, Praha.
- Šimík P. (2006): Znojemská rotunda v historických souvislostech. Klub přátel znojemské rotundy, pobočka Brno, www.znojemskarotunda.com, 5.8.2007.
- Vymazal M. (2006): Rotunda sv. Kateřiny – národní kulturní památka. Město Znojmo, www.znojmocity.cz/a/cz/4-rotunda-sv-kateriny-narodni-kulturni-pamatka/, 5.8.2007.
- Woznica L. (1993): Zhodnocení průzkumných vrtů při jihozápadní straně apsidy rotundy sv. Kateřiny ve Znojmě. MS, Woznica Brno, Brno, Jihomoravské muzeum ve Znojmě.

Seznam obrázků

- Obr. 1** Rotunda sv. Kateřiny ve Znojmě. Jihozápadní pohled.
- Obr. 2** Rotunda sv. Kateřiny ve Znojmě. Severozápadní pohled.
- Obr. 3** Malířská výzdoba rotundy sv. Kateřiny ve Znojmě.
- Obr. 4.** Pozice měřících bodů v rotundě, Mrlina J (2007).
- Obr. 5.** Mapa relativních výšek podlahy (dlažby), Mrlina J (2007).
- Obr. 6** Schéma gravimetru LaCoste & Romberg, <http://html.rincondelvago.com/files/4/8/1/000164815.png>, (2007).
- Obr. 7** Gravimetr LaCoste & Romberg, model D. Celkový pohled.

Obr. 8 Gravimetr LaCoste & Romberg, model D. Pohled ze shora – plocha s ovládacími prvky.

Obr. 9 Mapa korekcí na kruhové zdi rotundy (hodnoty v mikroGal), Mrlina J (2007).

Obr. 10 Profil Y = 35: Křivka Bouguerovy tíhové anomálie (po korekci na relativní nadmořskou výšku). Detailní zobrazení s hodnotami v mikroGal, Mrlina J (2007).

Obr. 11 Profil Y = 35: Křivka měřené tíže po základním zpracování (modrá) a po výpočtu (červená), hodnoty v mGal, Mrlina J (2007).

Obr. 12 Mapa reziduálních anomálií s korekcí na výšku a zdivo, Mrlina J (2007).

Seznam tabulek

Tab. 1 Výpočet statistické chyby