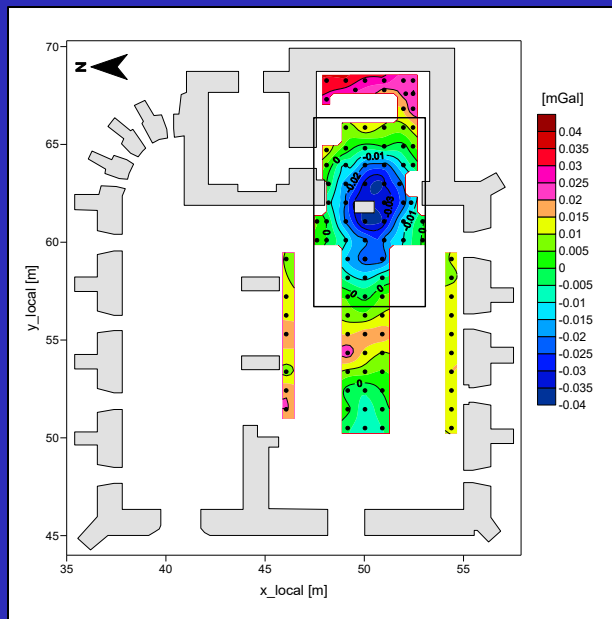


Príkladové štúdie (case-studies) z oblasti archeo-geofyziky: mikrogravimetria



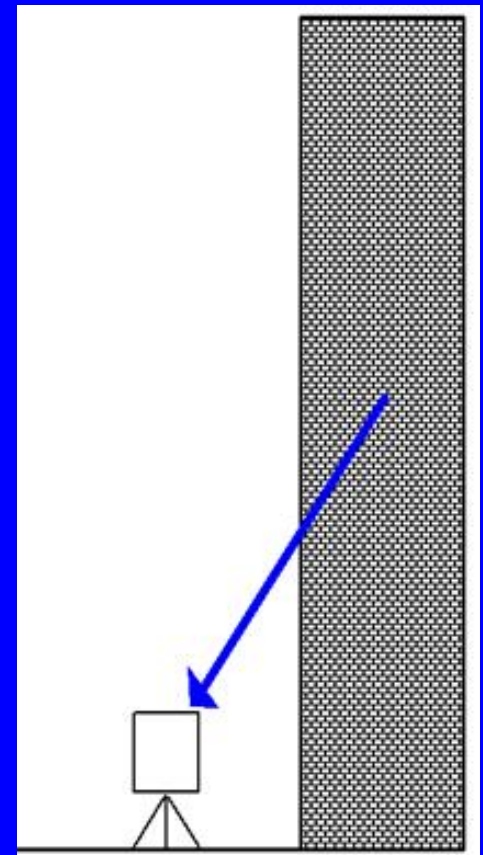
Príkladové štúdie (case-studies)

z oblasti archeo-geofyziky: mikrogravimetria

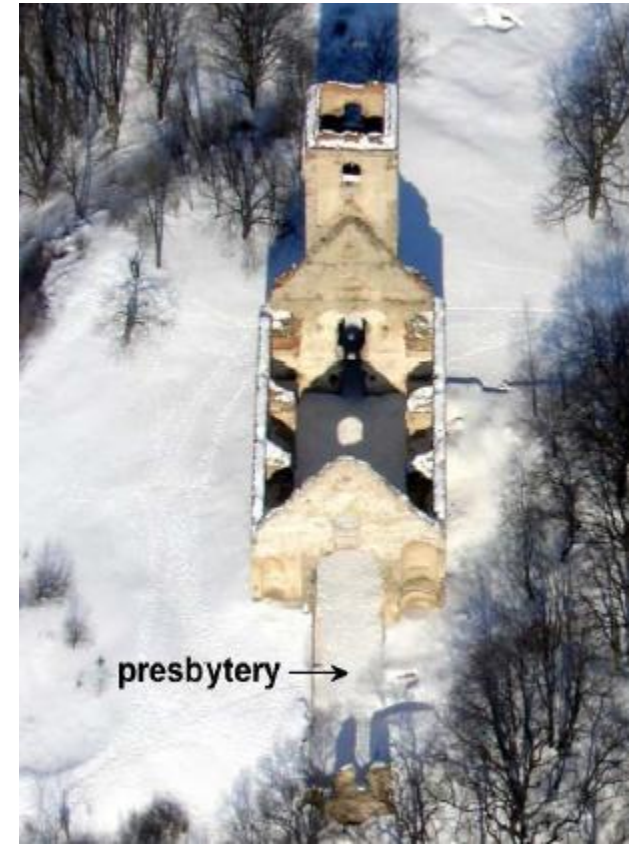
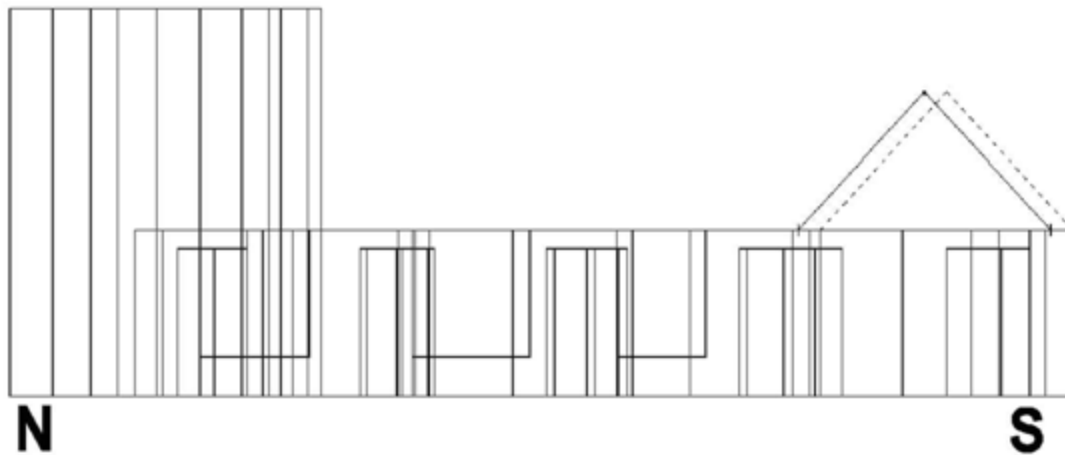
- dôraz na presný zber dát (vysokopresné gravimetre – Scintrex CG-3M, CG-5, CG-6, Lacoste&Romberg)
- väčšinou merania v sieti 1×1 m (občas krok 0.5 m)
- presné umiestnenie gravimetra na bode, merania výšky statívu od podlahy
- presné zameranie polôh bodov a ich vzdialeností od múrov, stĺpov a iných architektonických útvarov
- neúplná Bouguerova anomália, avšak veľmi dôležité sú opravy o gravitačné účinky múrov
- detekcia dutín (krypty, pivnice, chodby, jaskyne...)

opravy o gravitačné účinky múrov

- **aproximácia súborom jednoduchých geometrických telies (kvádrov)**
- **vertikálne hranoly s polygonálnym prierezom**
- **3D mnohosteny (polyédre) (nová metodika na báze fotogrametrie)**

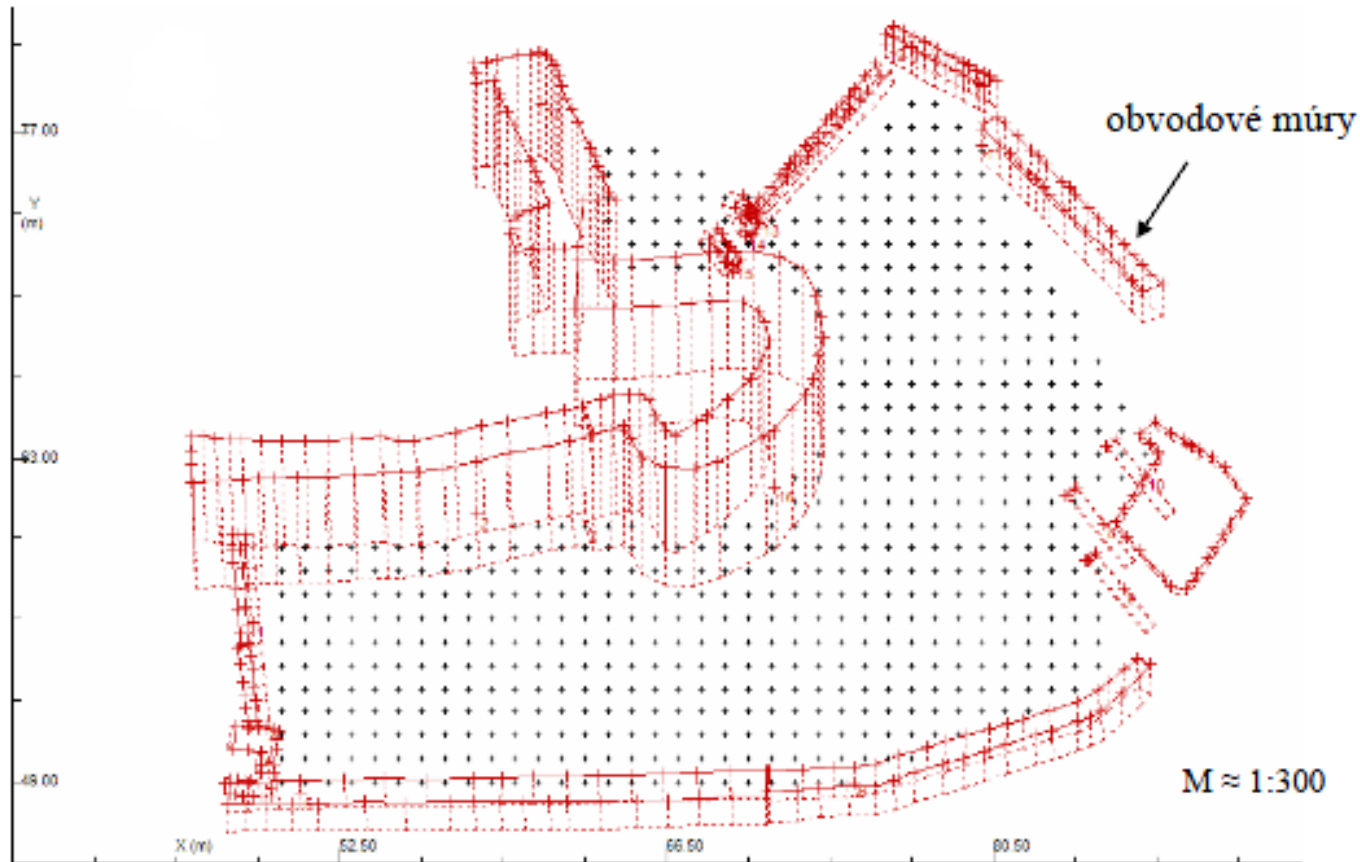


opravy o gravitačné účinky múrov



**pravouhlé hranoly – Katarínka
(starší prístup)**

opravy o gravitačné účinky múrov



vertikálne polygonálne hranoly – Oravský hrad

opravy o gravitačné účinky múrov

396 J. Panisova et al.



FIGURE 5
Photograph of church exterior (NW view from the cemetery).



FIGURE 6
Digital model of the church without a roof displayed with original textures in PhotoModeler Scanner software.

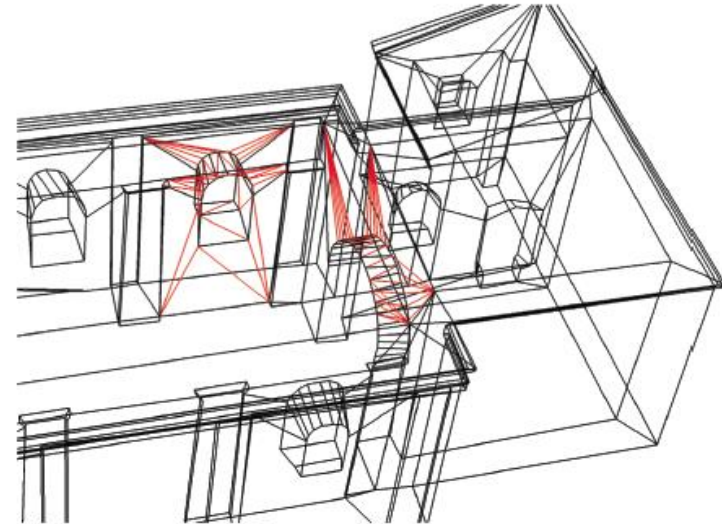


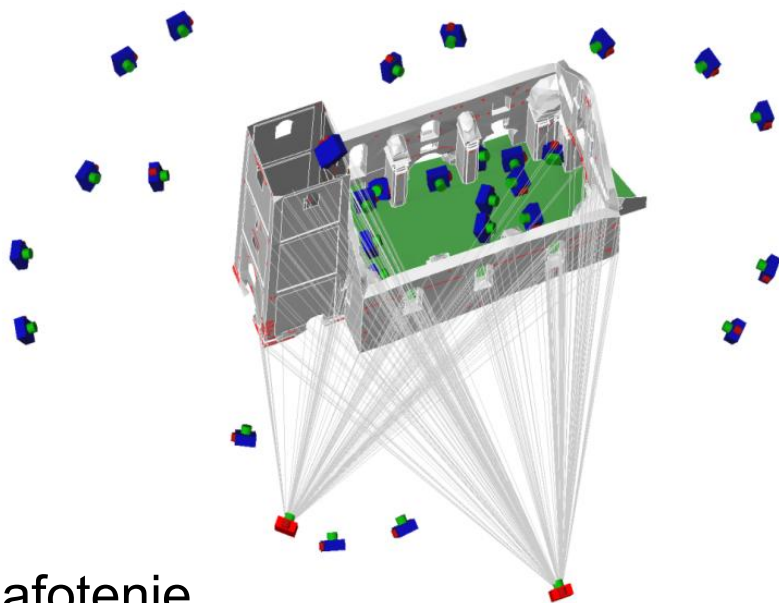
FIGURE 7
3D wire frame view of a selected part of the final model where the red lines represent a triangulation of several selected surfaces only.

3D mnohosteny (polyédre) – Horné Krškany

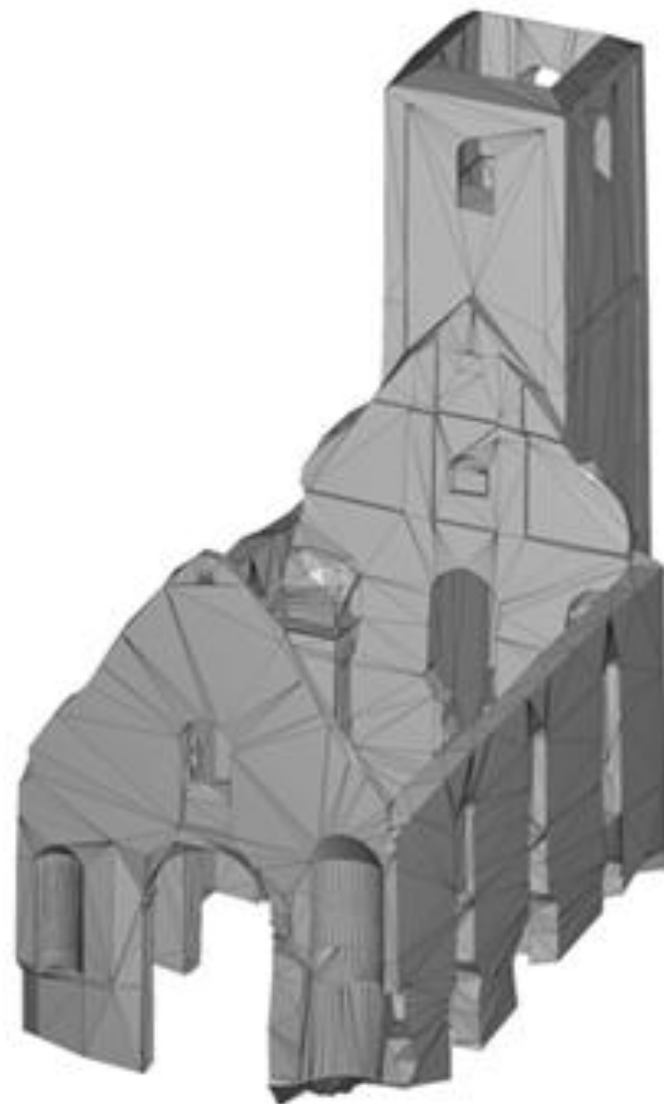
opravy o gravitačné účinky múrov



reálna situácia



nafotenie



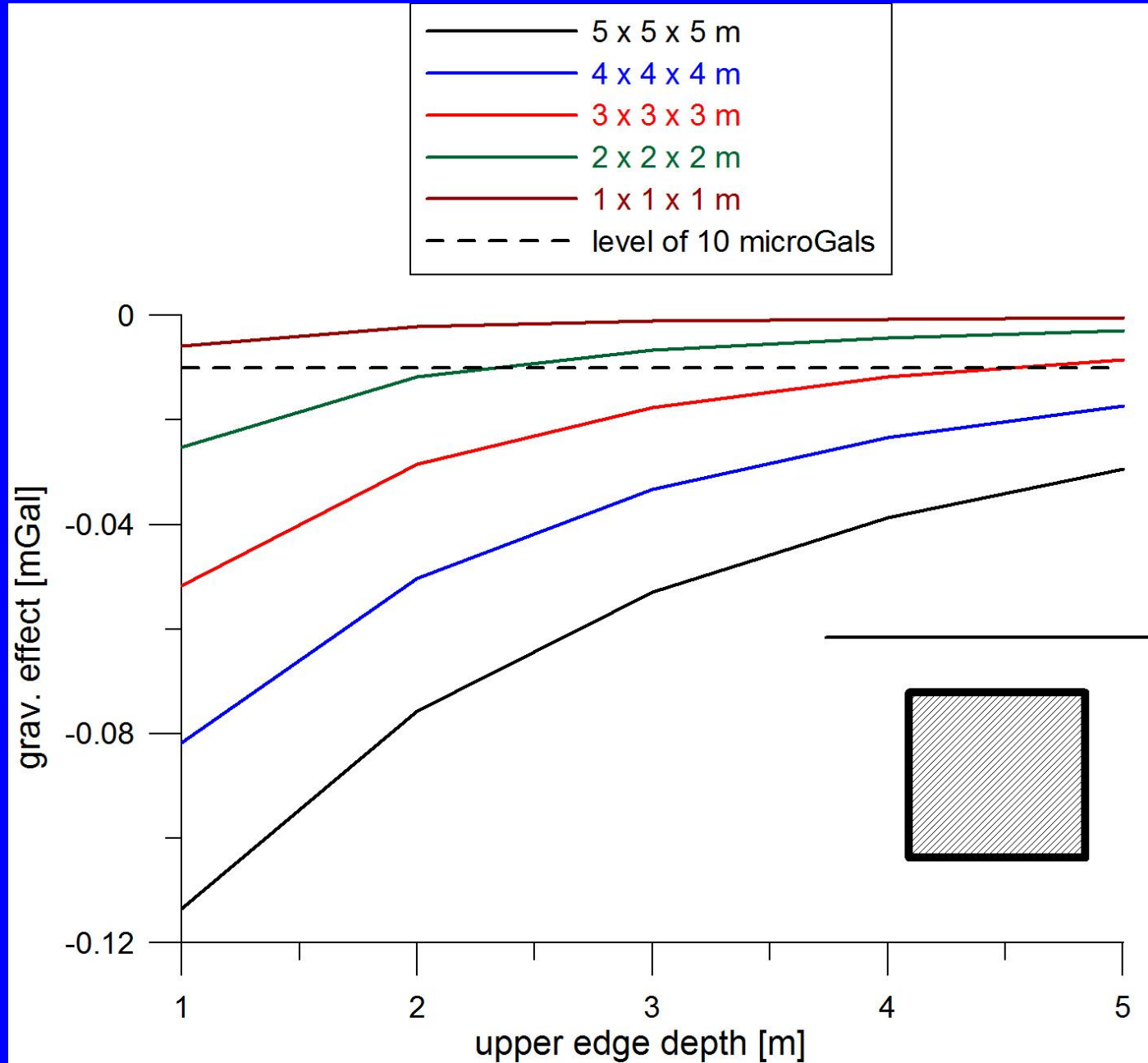
finálny 3D model

3D mnohosteny (polyédre) – Katarínka

veľkosť vs. hĺbka detekovateľných dutín

model:

kváder (-2.0 g.cm^{-3})
s rôznymi rozmermi
v rôznej hĺbke

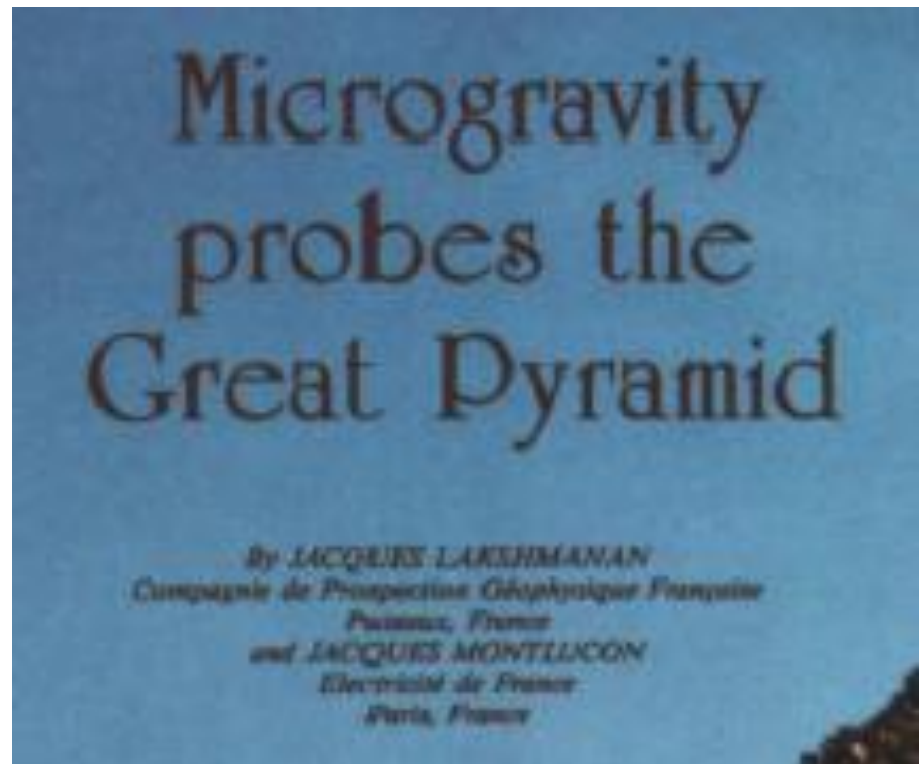


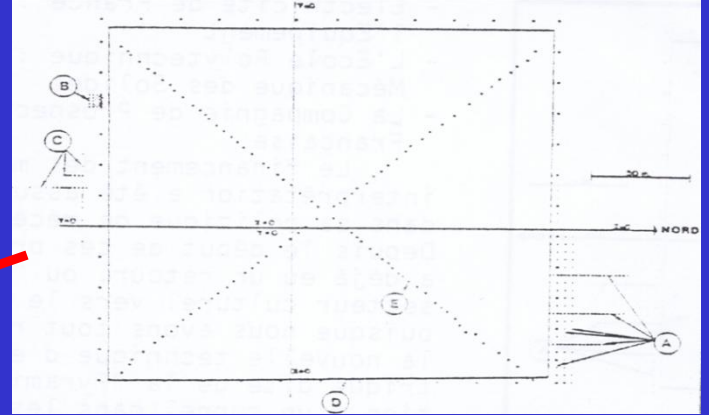
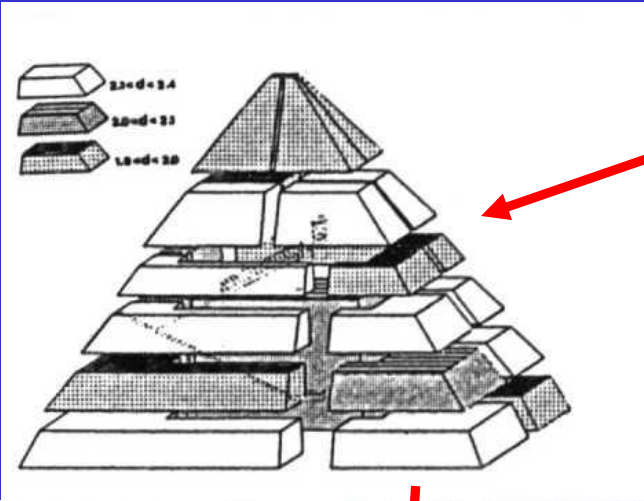


PRÍKLADY POUŽITIA MIKROGRAVIMETRIE V ARCHEOLÓGII – DETEKCIA DUTÍN

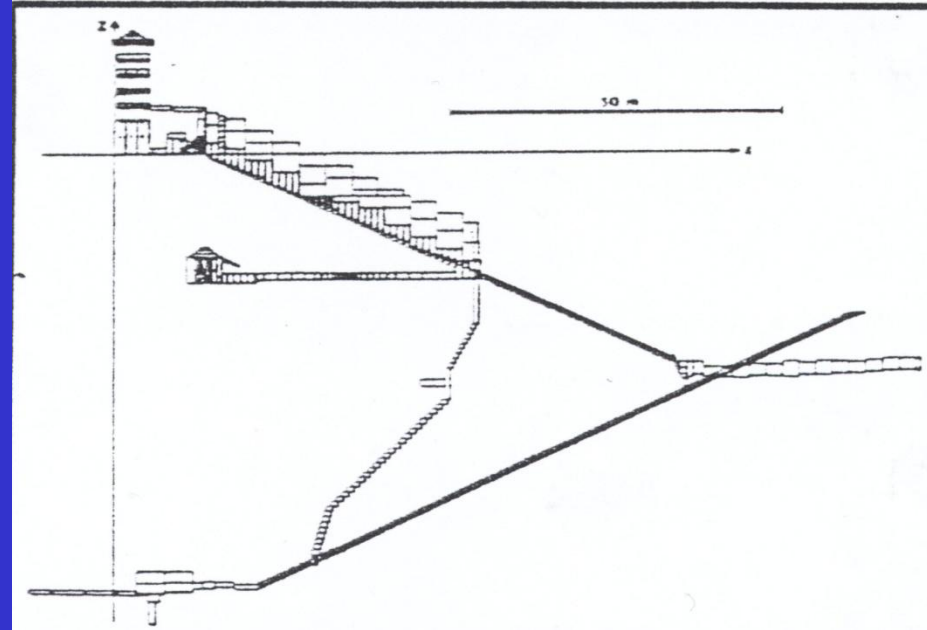
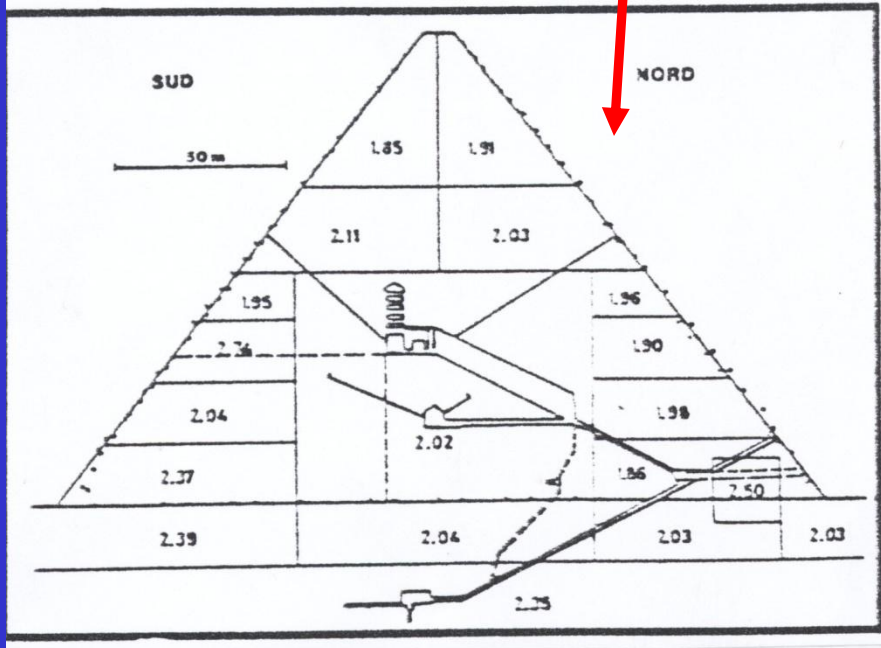
- **prieskum Cheopsovej pramídy**
- **prieskumu kostola Sv. Václava v Tovačove**
- **kostol a kláštor Katarínka, JZ Slovensko**
- **kostol Najsv. Trojice, Devín**
- **veľká terasa, Oravský hrad**

Cheopsova pyramída, Egypt – francúzsky mikrograv. prieskum





tvorba Bouguerovej anomálie –
- odstránenie gravitačných účinkov známych štruktúr



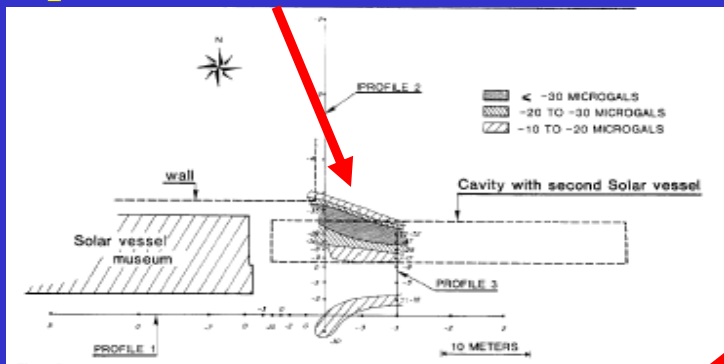
známe dutiny

model hustotného „rozvrstvenia“ pyramídy

Cheopsova pyramída, Egypt – francúzsky mikrogr. prieskum

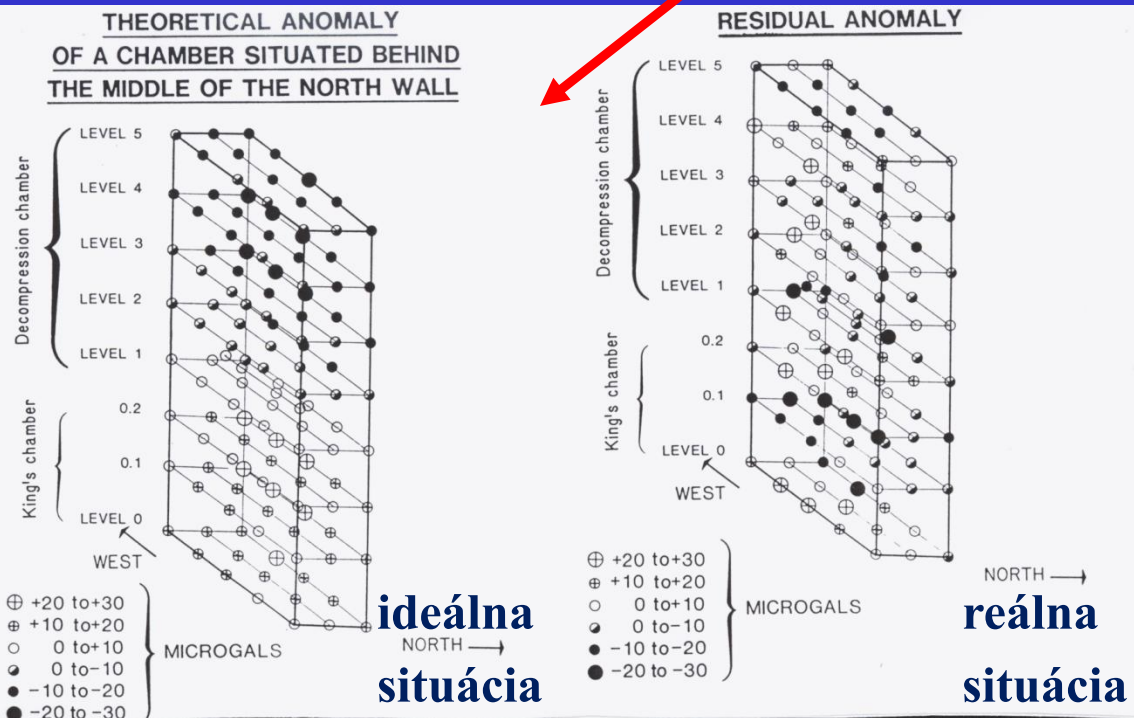
výsledky

overenie dutiny so slnečným
plavidlom faraóna



čiasťkový výsledok:

zistenie heterogénneho rozloženia
hodnôt anomálneho grav. zrýchlenia
v „Kráľovskej“ komnate

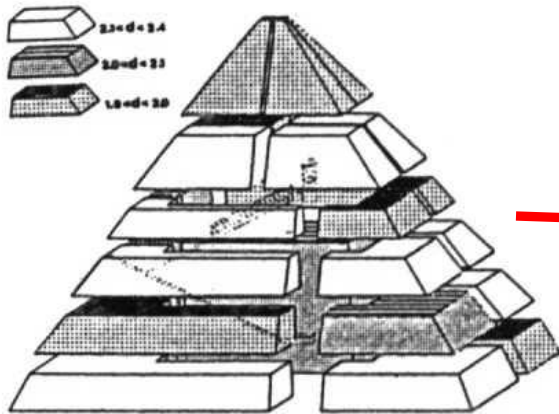


Cheopsova pyramída, Egypt – francúzsky mikrogr. prieskum

výsledky

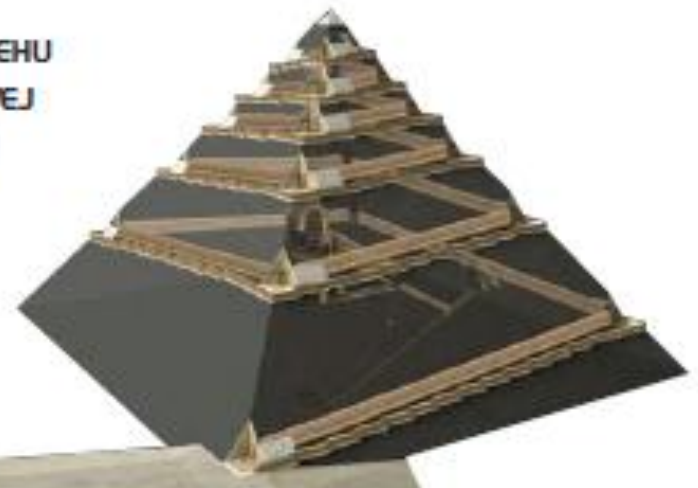
čiasťkový výsledok (v oblasti archeologickej hypotézy):

rozloženie modelovaných hustôt viedlo ku interpretácii, že hustotne oslabené zóny by mohli súvisieť s prejavom vnútornej rampy, ktorá mohla ísť špirálovito smerom nahor pozdĺž obvodu pyramídy



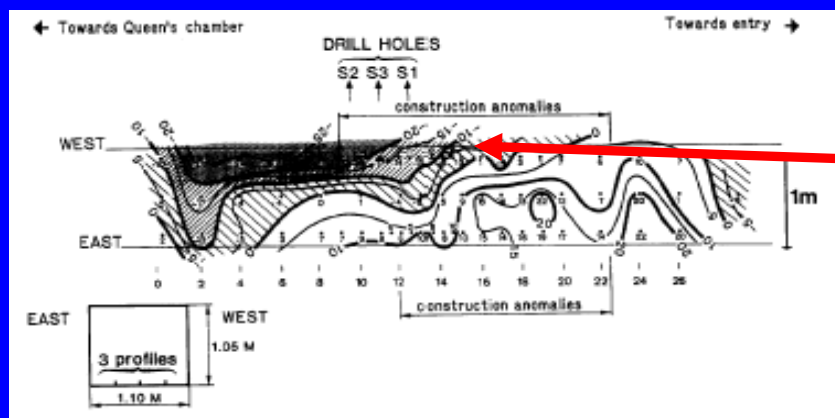
Densities of the large block structure of the Cheops Pyramid.

INTERPRETÁCIA PRIEBEHU
VNÚTORNEJ ŠPIRÁLOVEJ
RAMPY V CHUFUOVEJ
PYRAMÍDE



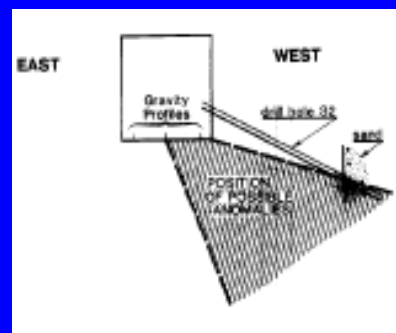
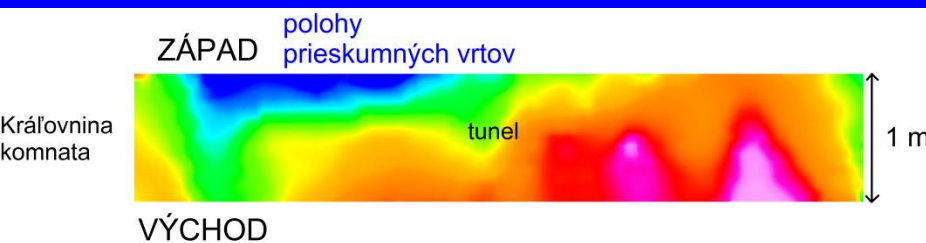
Cheopsova pyramída, Egypt – francúzsky mikrogr. prieskum

výsledky



hlavný výsledok:

zistenie dominantnej negatívnej anomálie v západnej časti prístupovej chodby do „kráľovninej“ pohrebnej miestnosti



3 vrty dosiahli po 2.1 m dutinu vyplnenú pieskom,
(modelovaný objem dosahuje až 40 m^3)

výsledky mikrogravimetrického prieskumu kostola Sv. Václava v Tovačove (Bližkovský 1976, 1979)

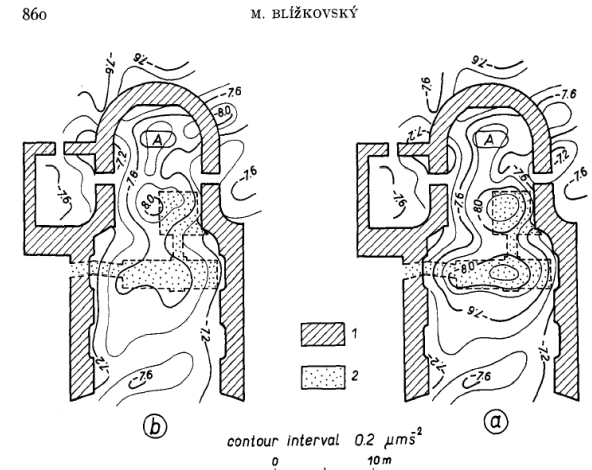
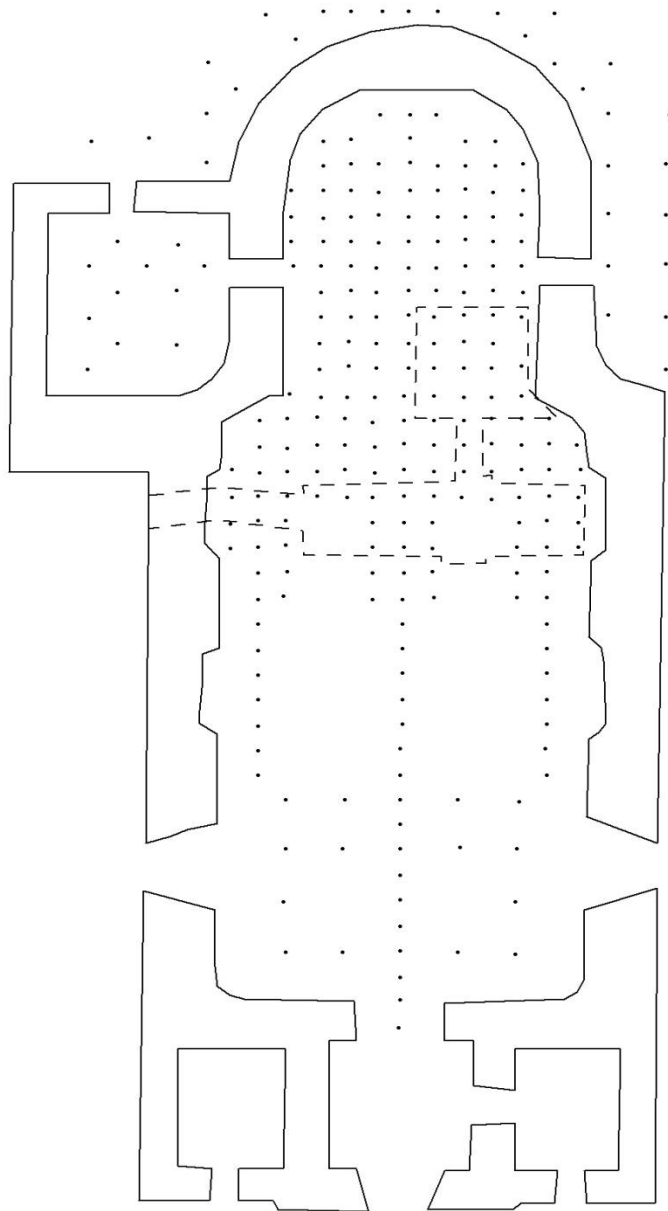
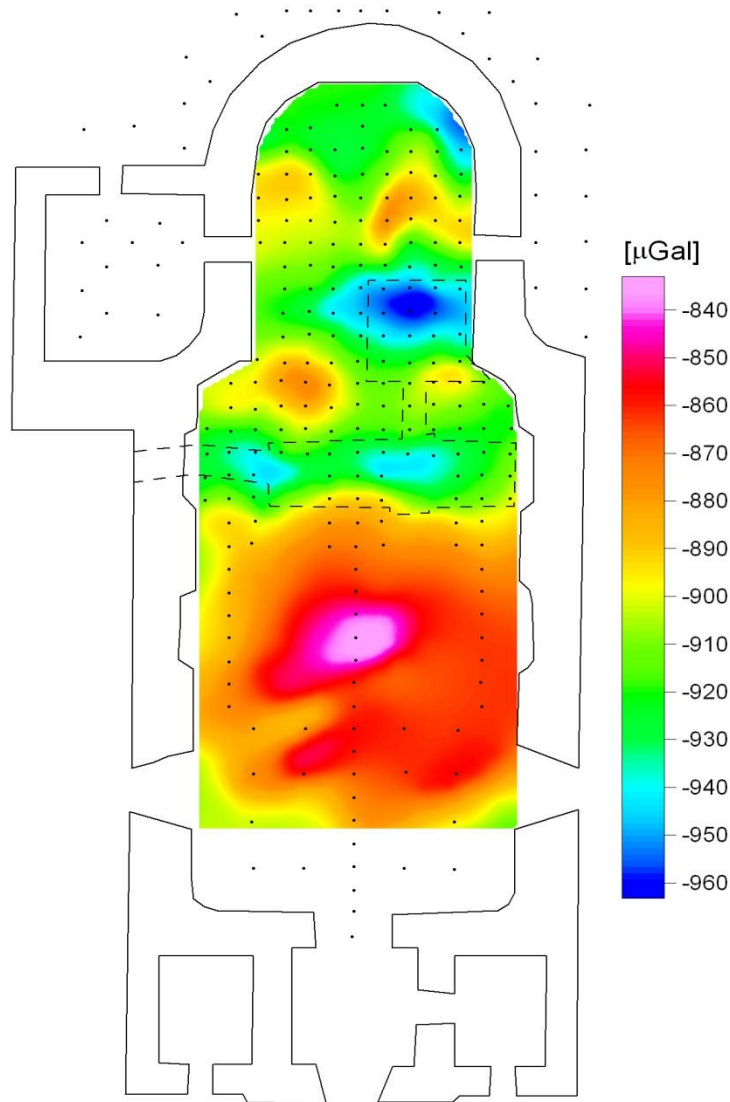


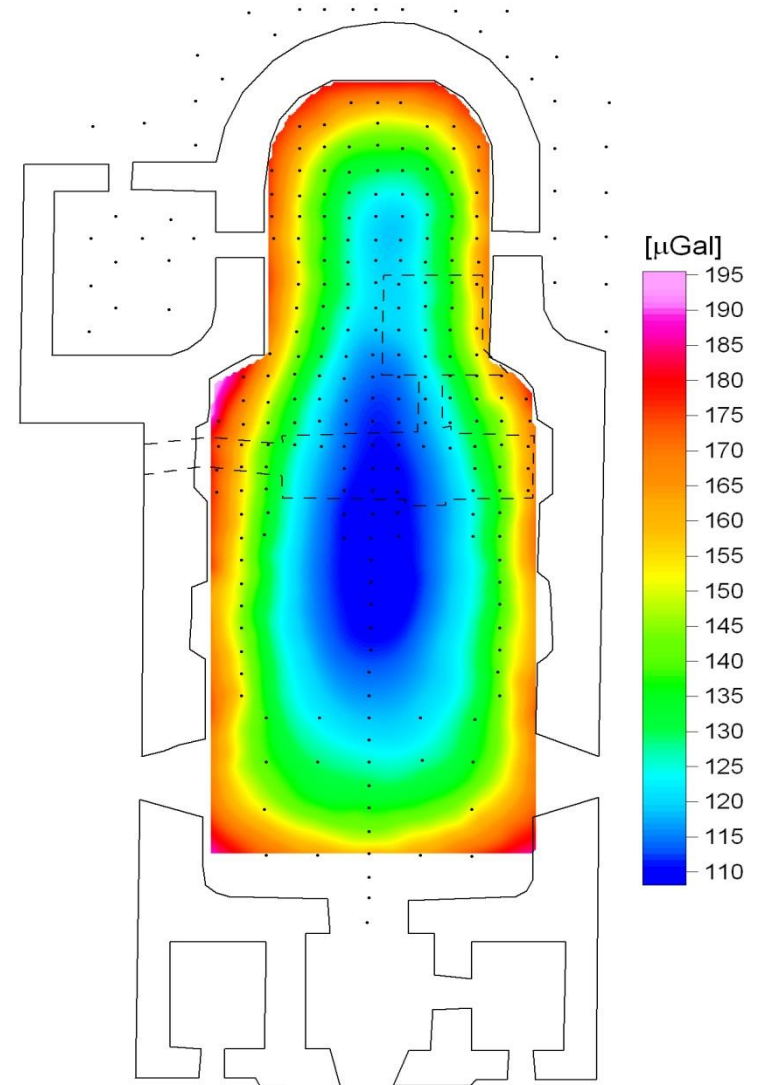
Fig. 10. Maps of Bouguer anomalies in the St. Václav church Tovačov. a) map corrected for gravity effect of walls, b) map corrected for gravity effects of walls and crypts.

- mikrogravimetria v sieti 1 x 1 m a 2 x 2 m, spolu 262 bodov
- stredná kvadratická chyba meraného tiažového zrýchlenia = 0.011 mGal
- interpretované anomálie s amplitúdou 0.06 mGal = 60 μGal

výsledky mikrogravimetrického prieskumu kostola Sv. Václava v Tovačove (Bližkovský 1976, 1979)

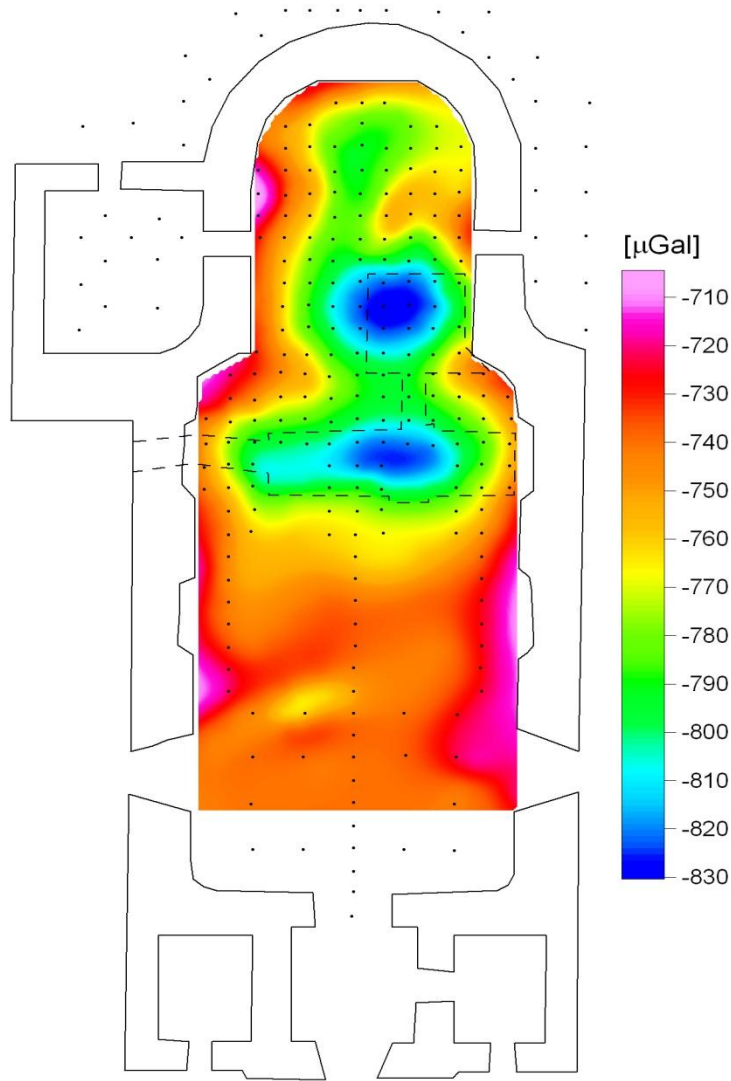


neúplná Bouguerova anomália
(bez topokorekcií a opráv na účinky múrov)

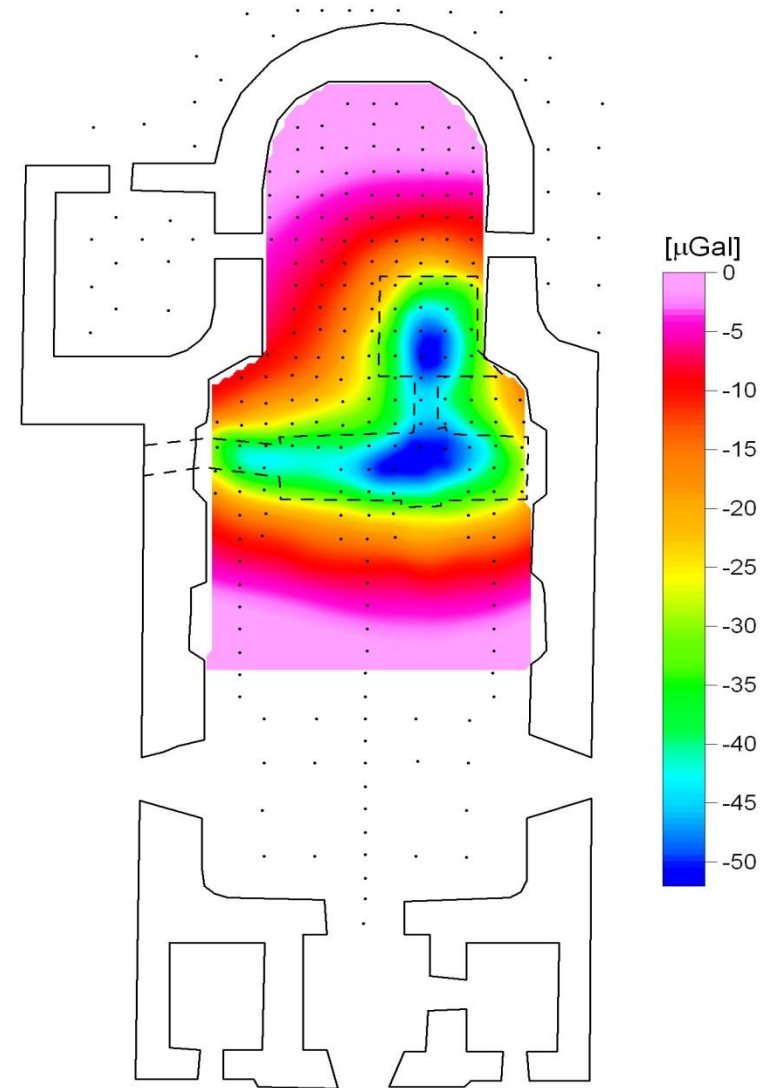


gravitačný účinok múrov

výsledky mikrogravimetrického prieskumu kostola Sv. Václava v Tovačove (Bližkovský 1976, 1979)

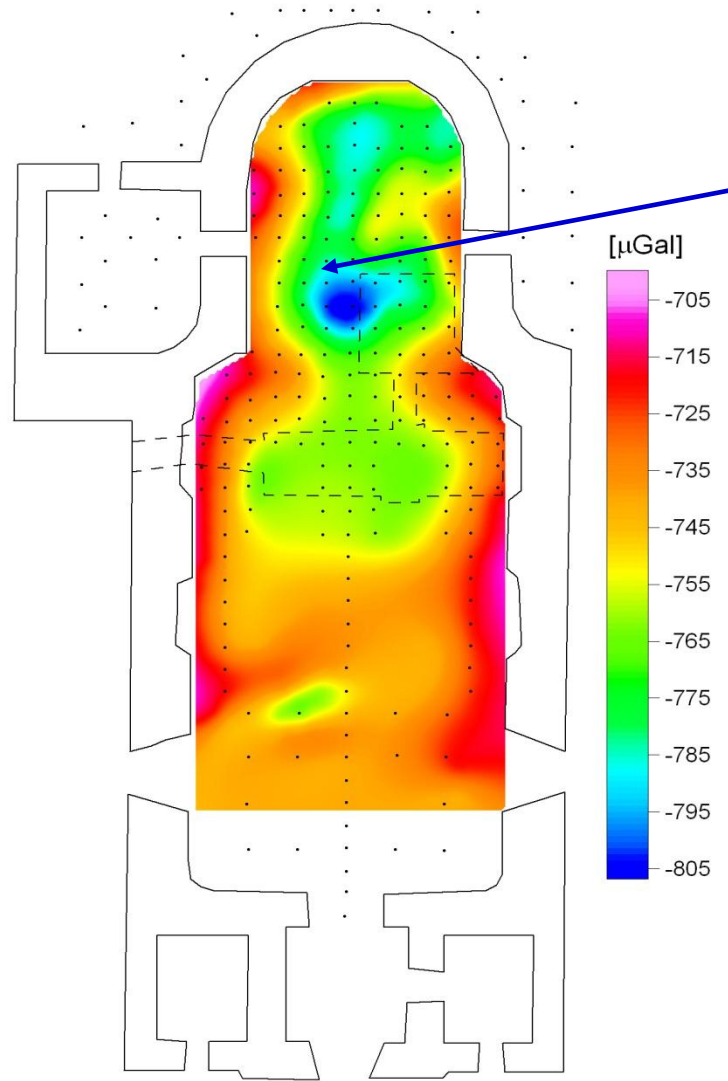


úplná Bouguerova anomália
(s opravami na účinky múrov)



gravitačný účinok známych krypt

výsledky mikrogravimetrického prieskumu kostola Sv. Václava v Tovačove (Bližkovský 1976, 1979)



v priestore výslednej
negatívnej anomálie
boli nájdené nové,
dovtedy neznáme
priestory

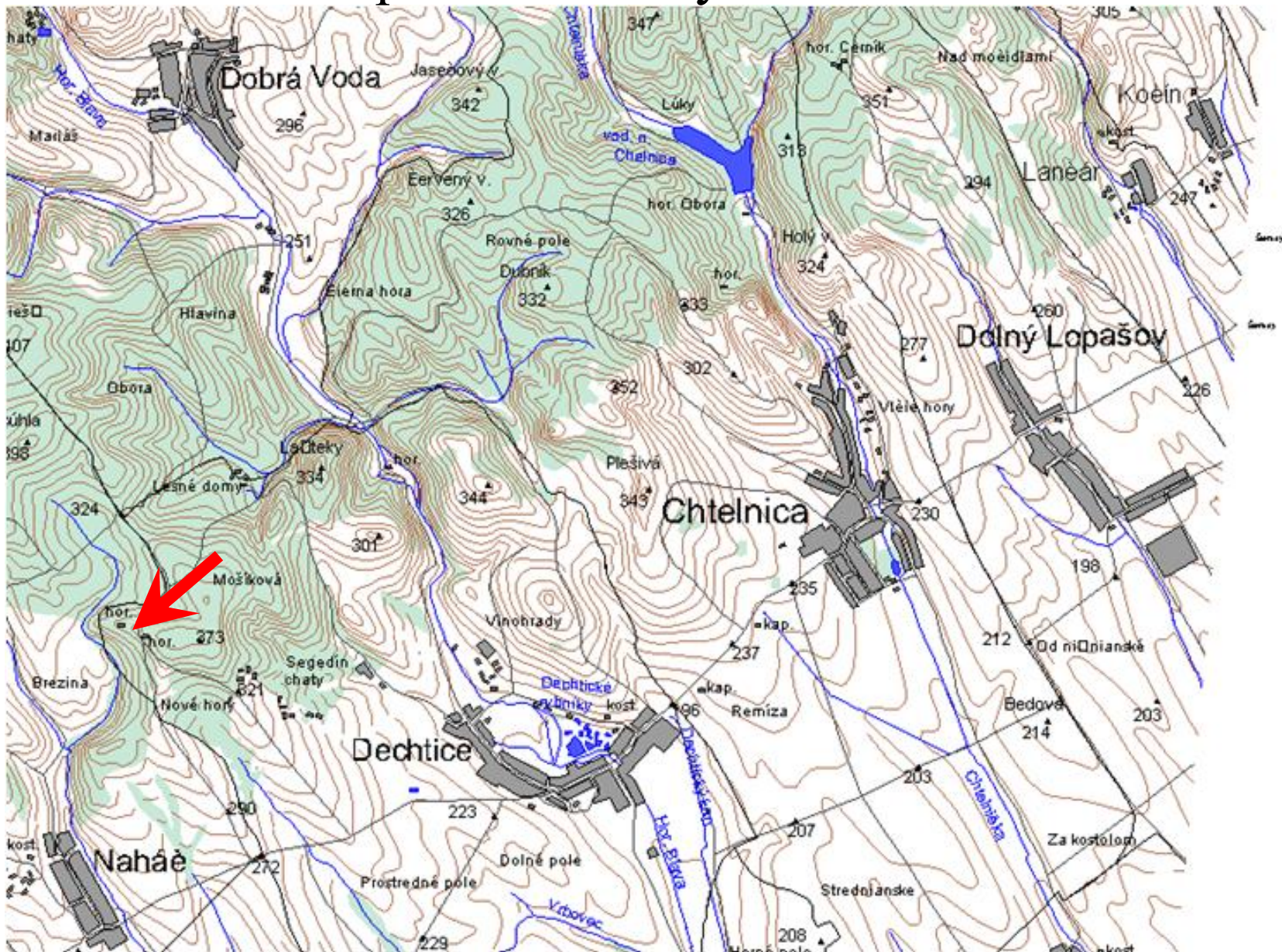
výsledok: úplná odkrytá (stripped) Bouguerova anomália
(s odstránením účinkov známych dutín)

kláštor a kostol
KATARÍNKA

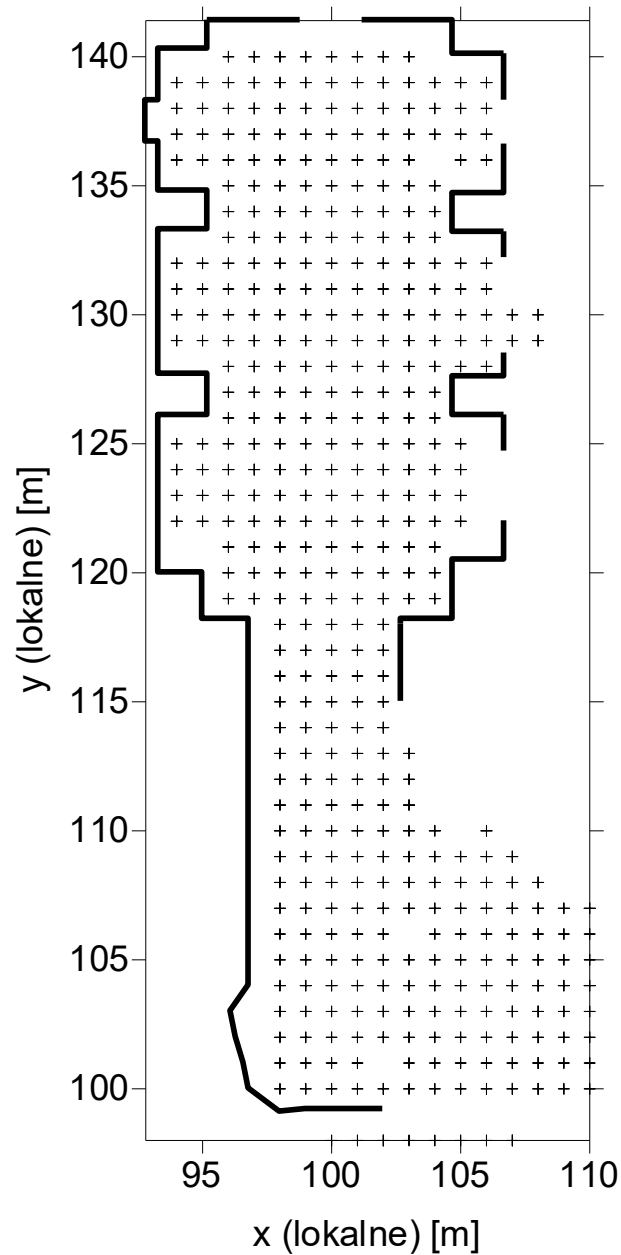
VÝSLEDKY GEOFYZIKÁLNEHO
PRIESKUMU
(1998 - 2000)



poloha lokality Katarínka



mikrograv. merania v lodi kostola

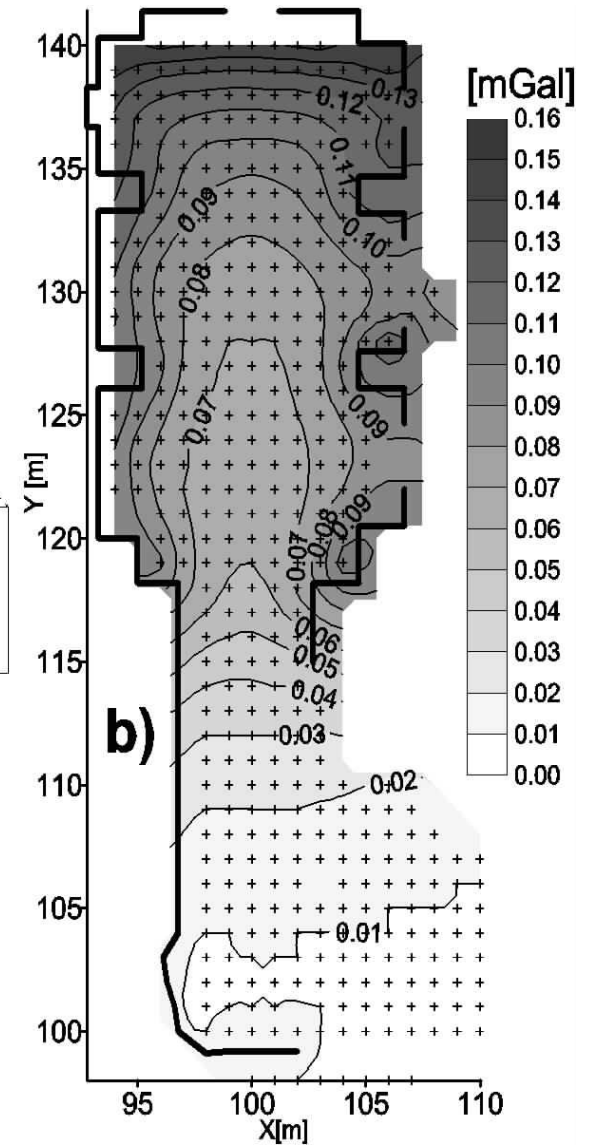
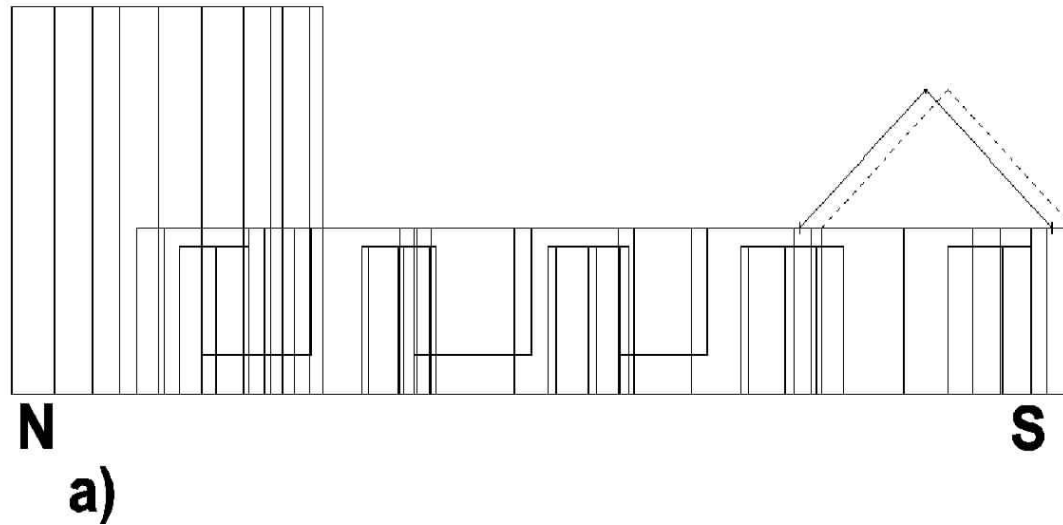


zmeraných 428 bodov



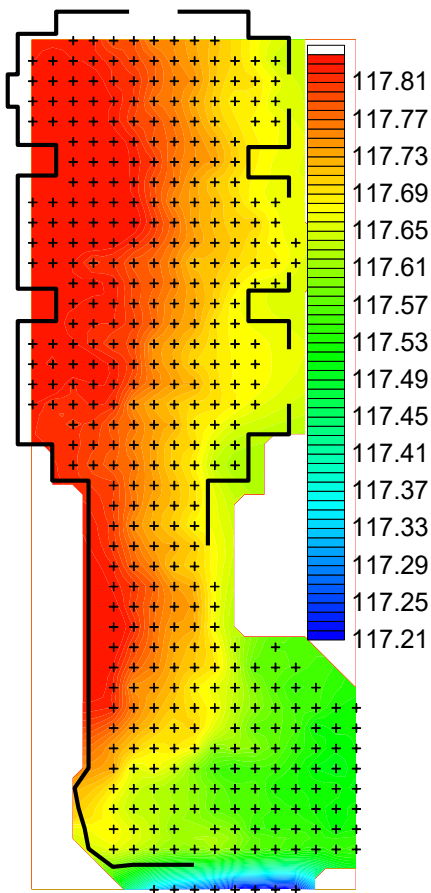
prístroj: Sodin 214GT

Katarínka - model a účinok múrov

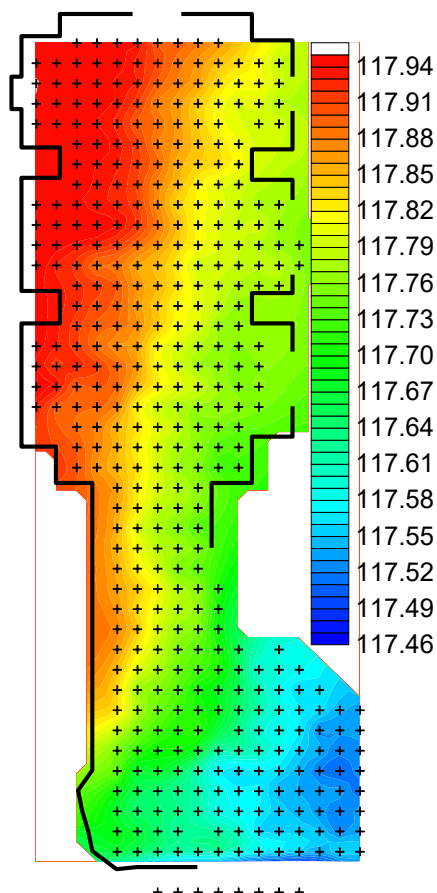


lokality Katarínka - vývoj mapy reziduálních anomálií

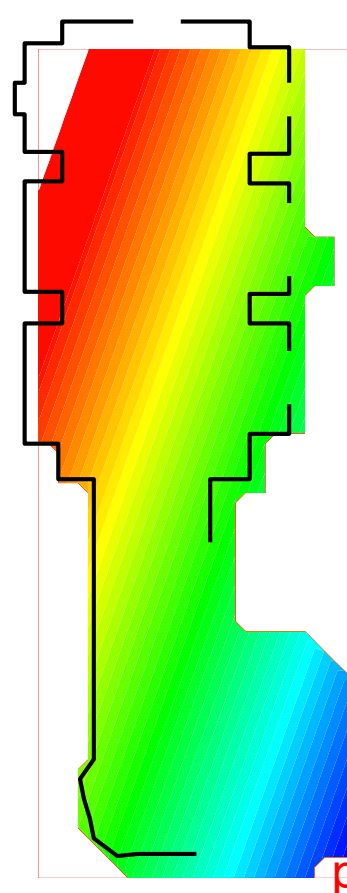
úplné Bougerove
anomálie pre red.
hustotu 2.4 g.cm^{-3}



úplné Bougerove
anomálie pre red.
hustotu 2.4 g.cm^{-3}
+ oprava na múry



regionálny trend

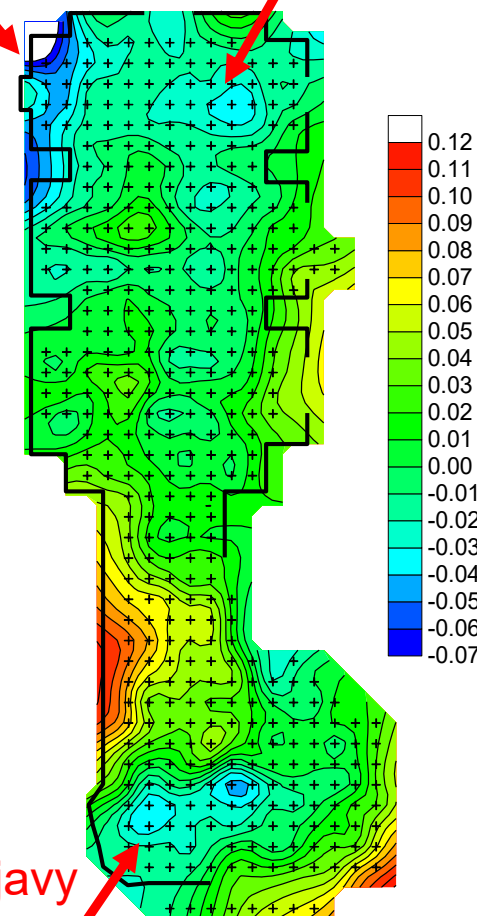


reziduálne anomálie
pre 2.4 g.cm^{-3}

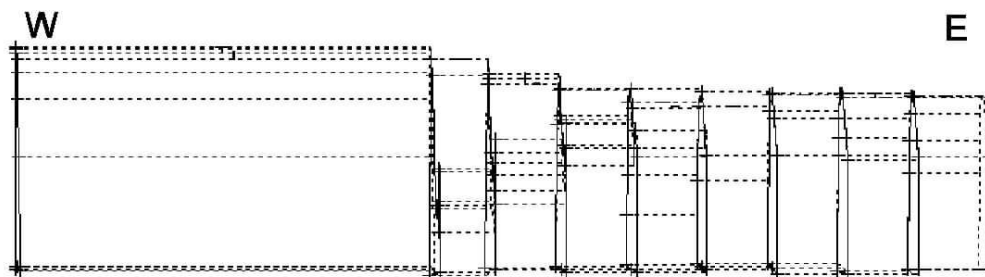
prejavy
krypty?

prejavy
krypty?

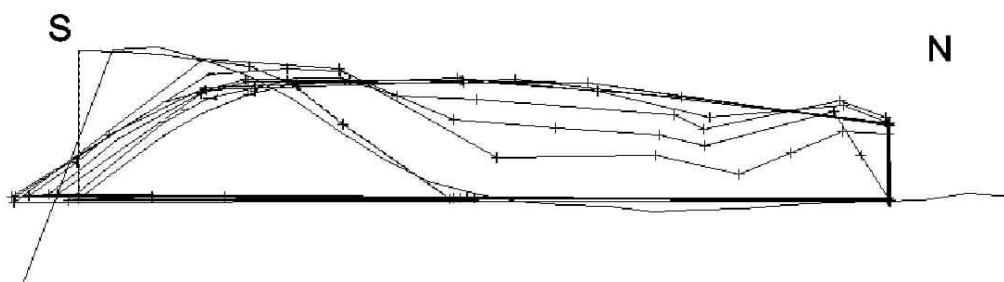
prejavy
krypty?



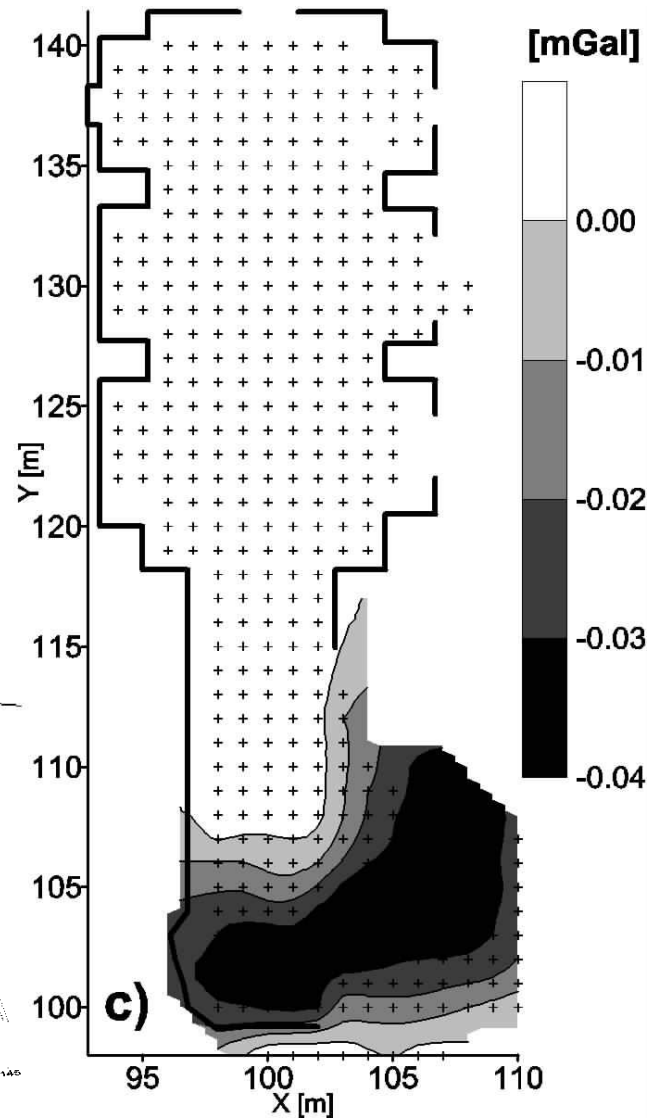
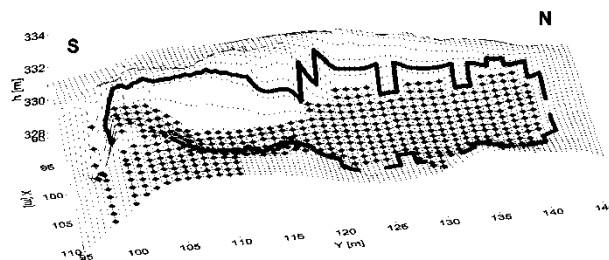
Katarínka - model a účinok sute



a)



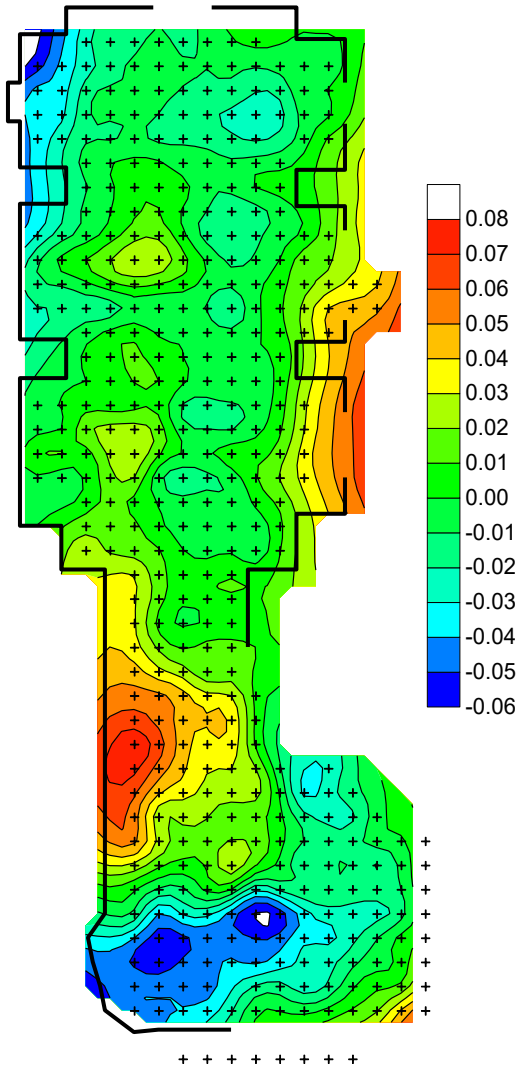
b)



c)

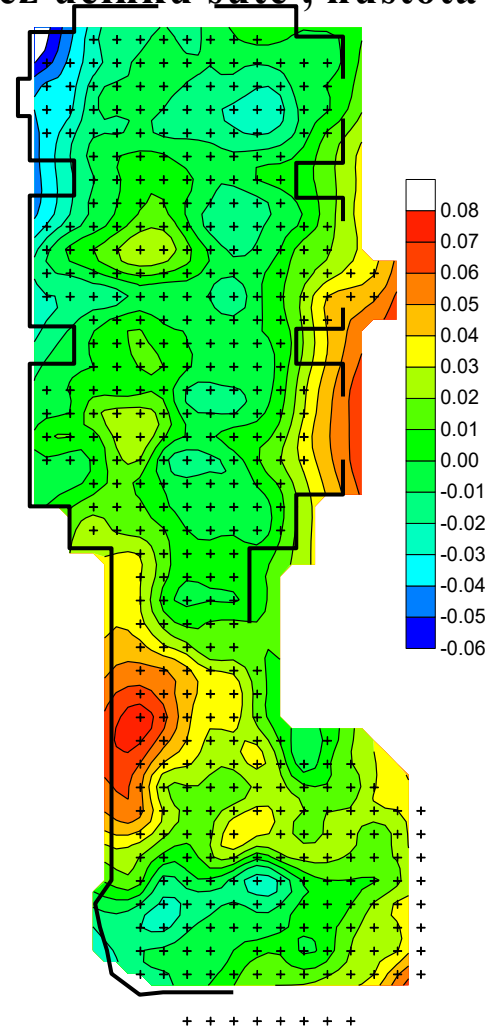
lokality Katarínka - pokus o èiastoènè odkrytie (- úèinok sute)

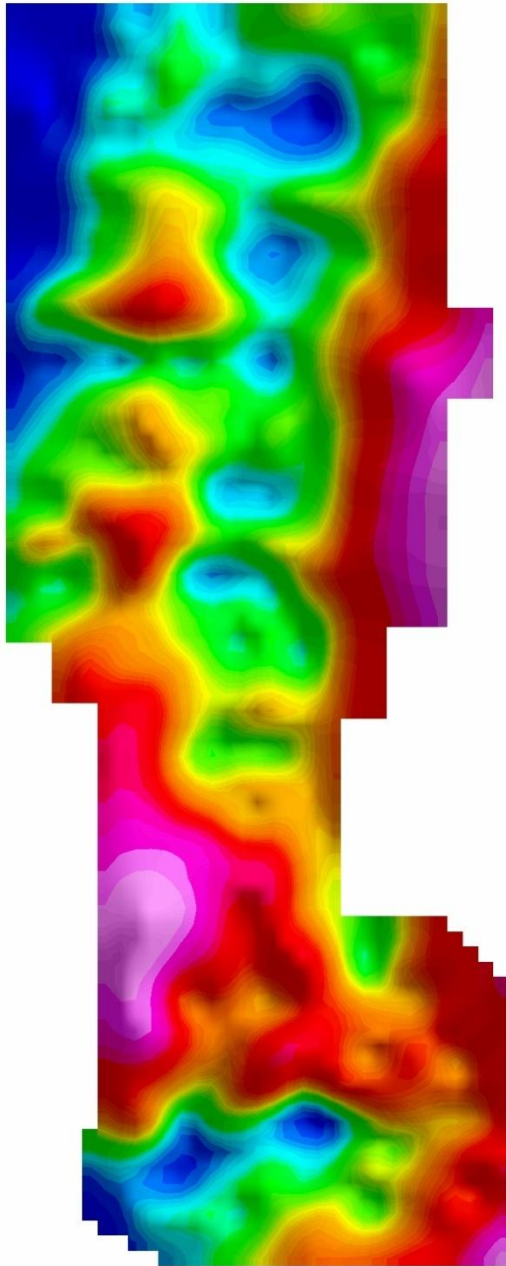
reziduálne anomálie
pre 2.4 g.cm^{-3}



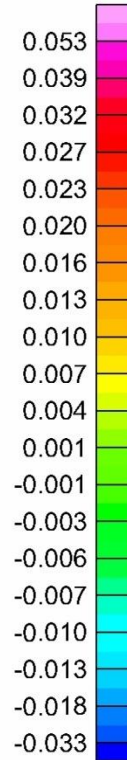
reziduálne anomálie
pre 2.4 g.cm^{-3}

bez úèinku sute, hustota (-0.6 g.cm^{-3})





[mGal]



**anomálne prejavy krýpt
podľa mikrogravimetrie –
výsledné pole reziduálnych
Bouguerových anomálií**

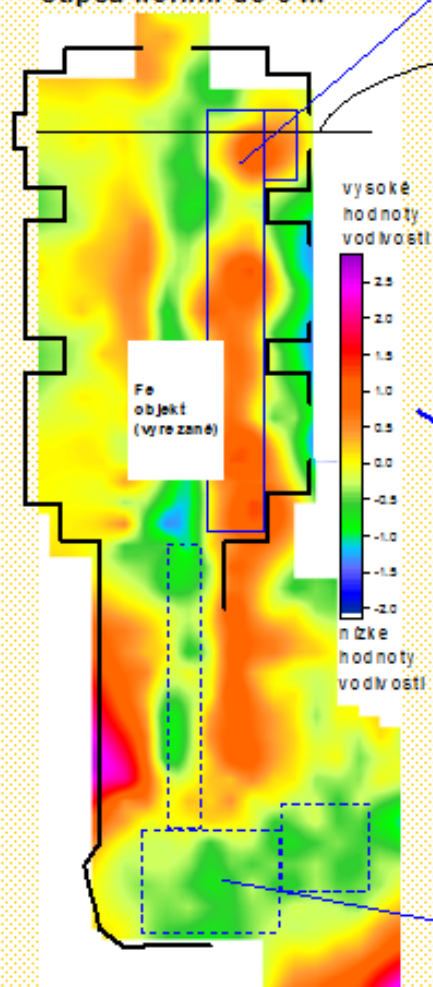
geoelektrické merania zemskej vodivosti



princípy
merania

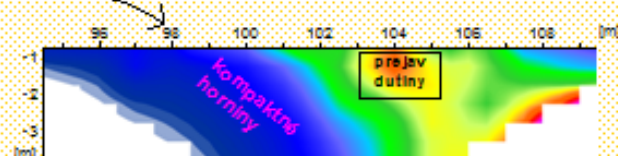


namerané pole vodivosti
stĺpca hornín do 6 m



prejav pásu
vodivého
prejavu krypt

rez vodivosti do 4 m



výsledky merania
vodivosti z oblasti
lože kostola

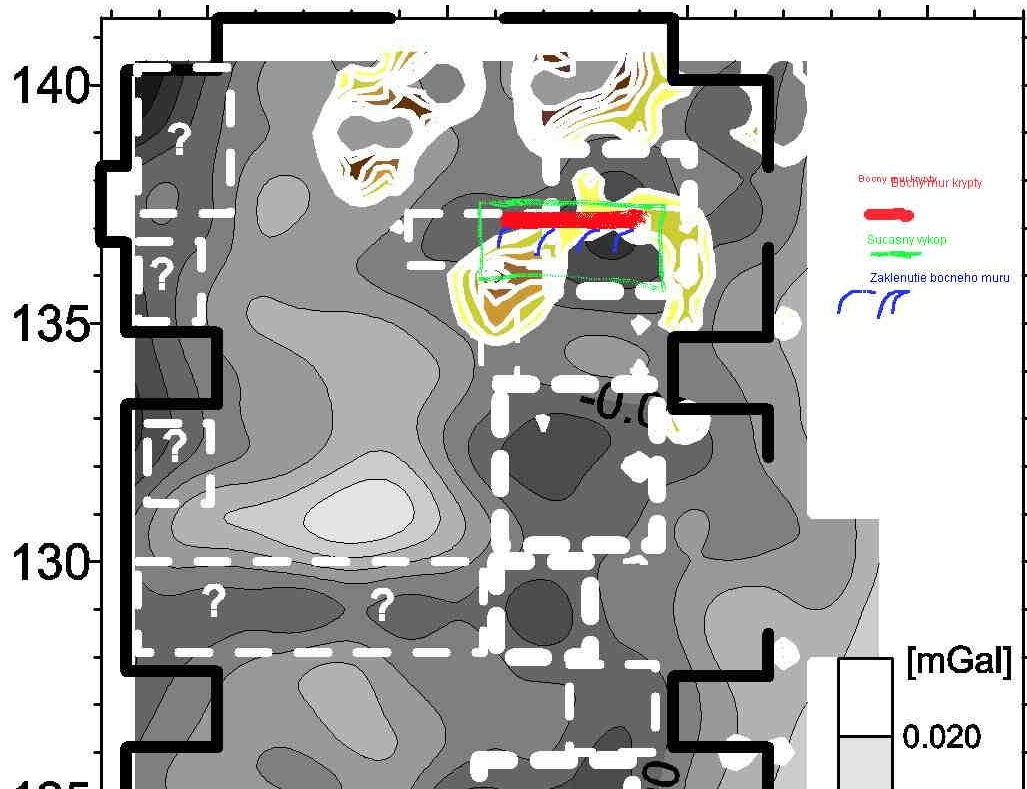


praktické
meranie
v teréne



prejavy výskytu
prítomnosti
nevodivých
dutín (v skale)

overenie anomálie - leto 2000



pri kopaní sondy sa najprv objavil severný múr a potom neskôr aj južný (klenba bola úplne preborená)



úplné otvorenie krypty - leto 2001



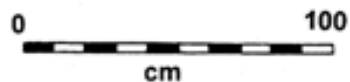
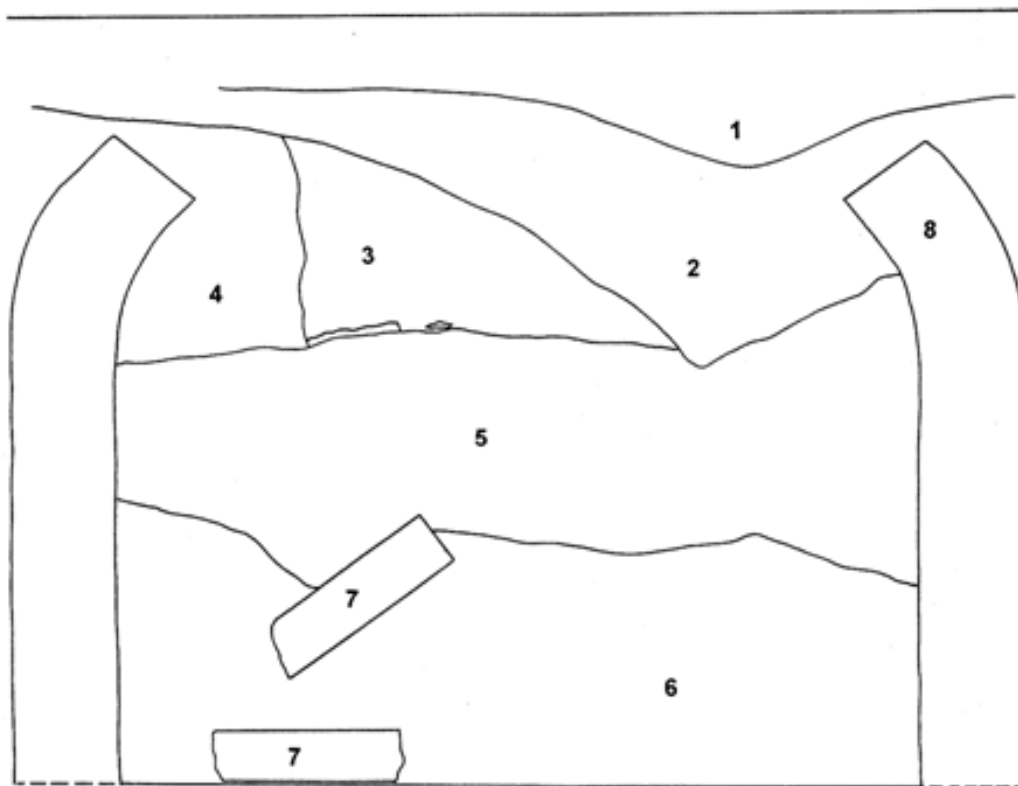
rez kryptou - leto 2001

Dechtice – Sv. Katarína
Zisťovací archeologický výskum
Dátum: 01.07. – 31.08. 2000/2001
Zameral: Urminský
Západoslovenské múzeum Trnava

Kostol sv. Kataríny: Sonda III/2000-2001
Krypta - rez

LEGENDA

- 1 – Sútina zmiešaná s omietkou a tmavou humóznou vrstvou
- 2 – Zlomky tehál a ľudských kostí premiešané s tmavou humóznou vrstvou
- 3 – Zlomky tehál, strešnej krytiny a suty, zvyšky drev z rakiev
- 4 – Tmavý humózný zásyv
- 5 – Sútina, kamene, celé tehly, ojedinelo ľudské kosti
- 6 – Zhluky vzpričených tehál vytvárajúcich menšie dutiny, súšina, tesne nad úrovňou dna koncentrácia ľudských kostí v sekundárnych polohách, drobné kovové nálezy (ozdoby), klince drevo z rakiev zdobené nitmi
- 7 – Kameňný architektonický článok
- 8 – Obvodové múrivo krypty



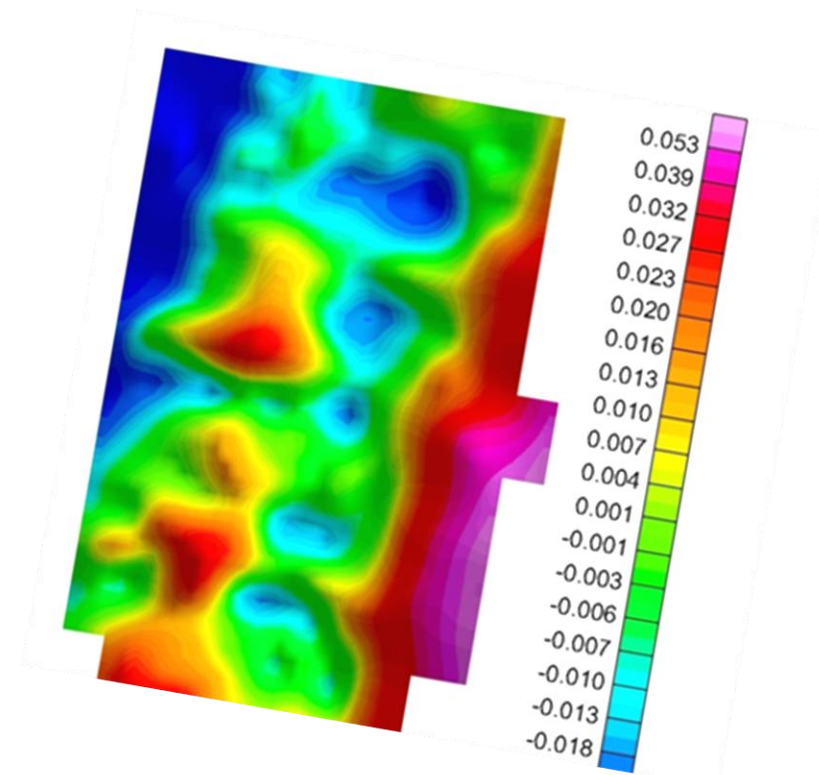
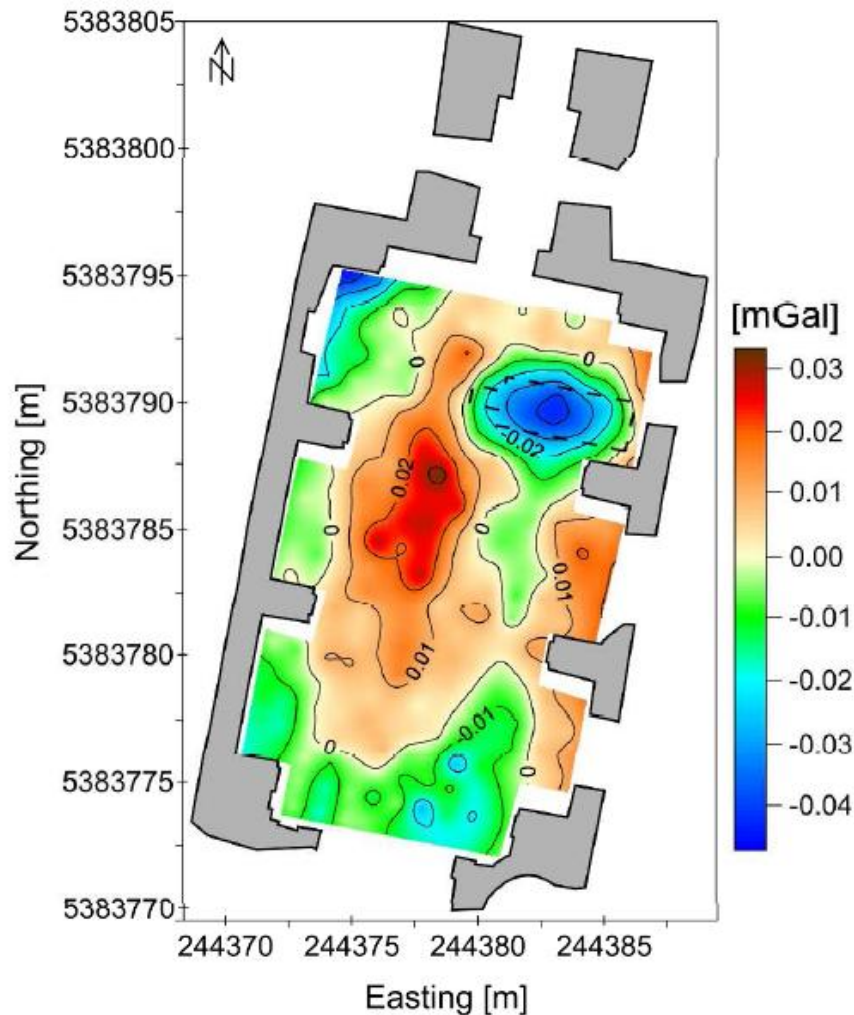
krypta bola kompletne zasypaná – napriek tomu bolo možné ju mikrogravimetricky detekovať (!)

uzavretie krypty - leto 2001



opätovné premeranie v rámci letnej školy archeo-geofyziky v roku 2011

d'alsie krypty boli overené
aj radarom (na budúce ...)



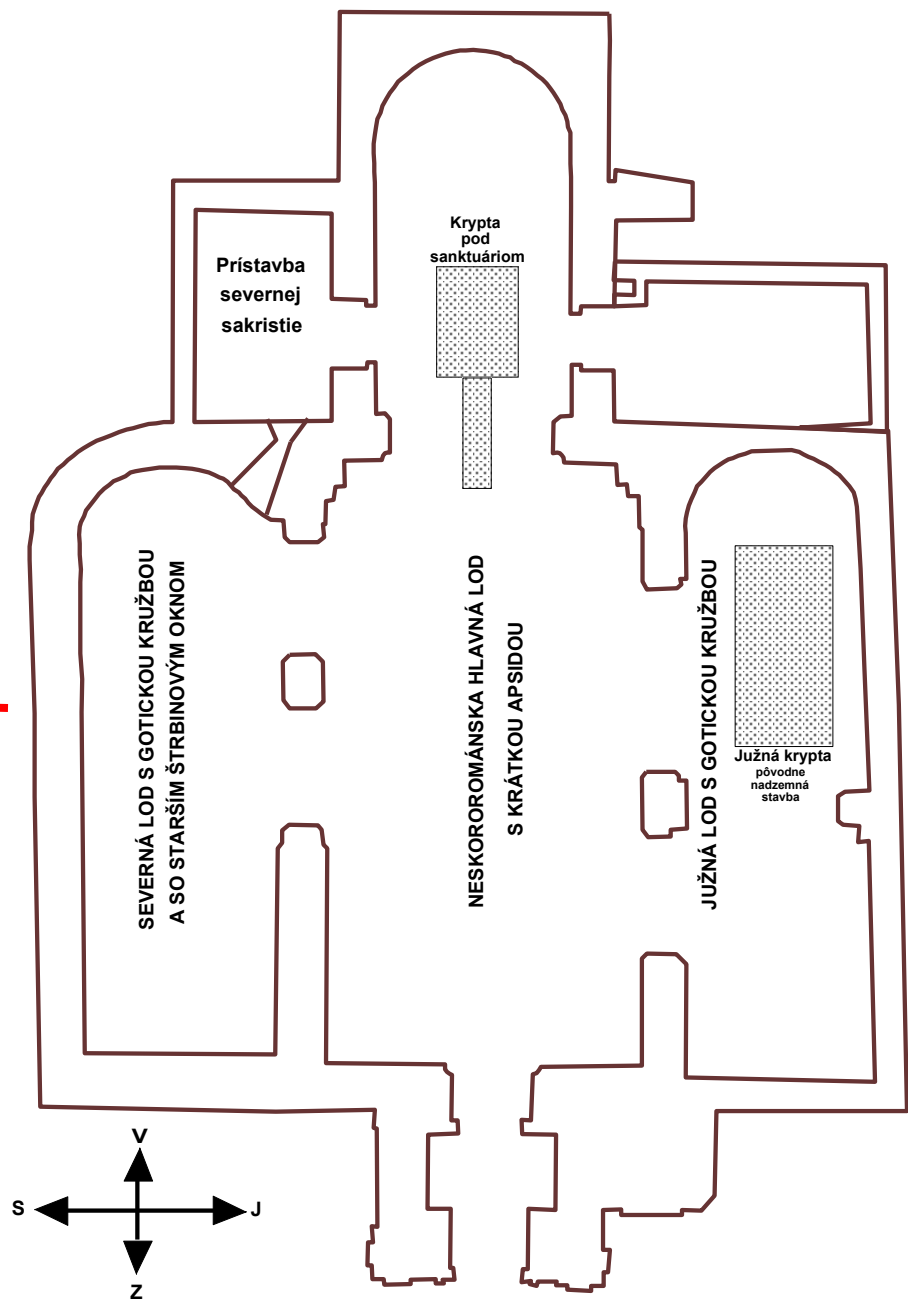
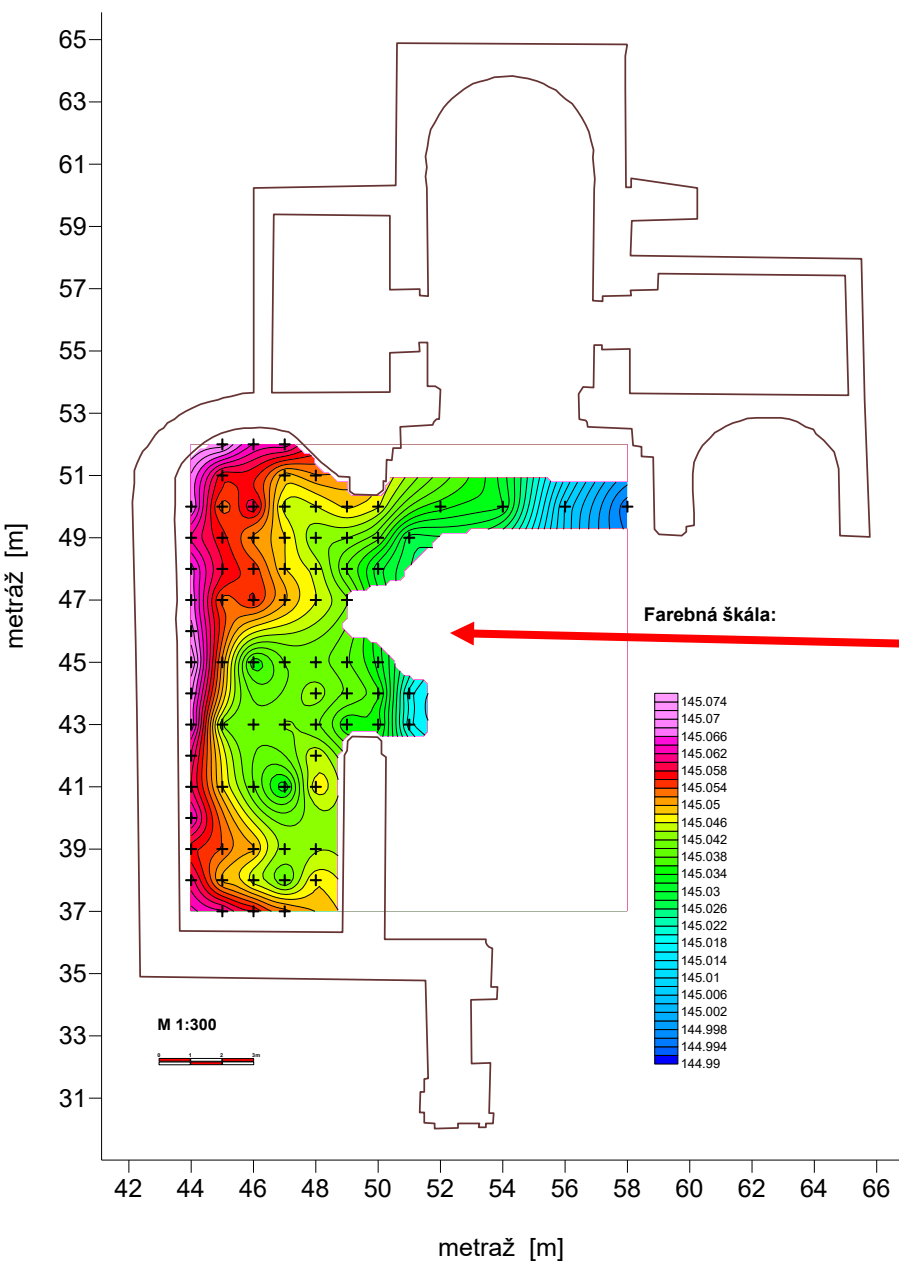
na porovnanie –
- výsledok z 1998

prieskum farského kostola Najsv. Trojice v Devíne

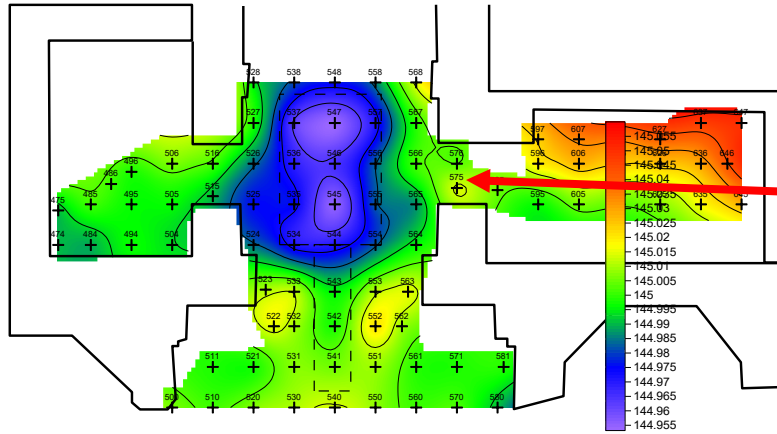


**snahou bolo nájsť dutinu
v priestore pod existujúcou
kryptou (alebo vedľa nej?)**

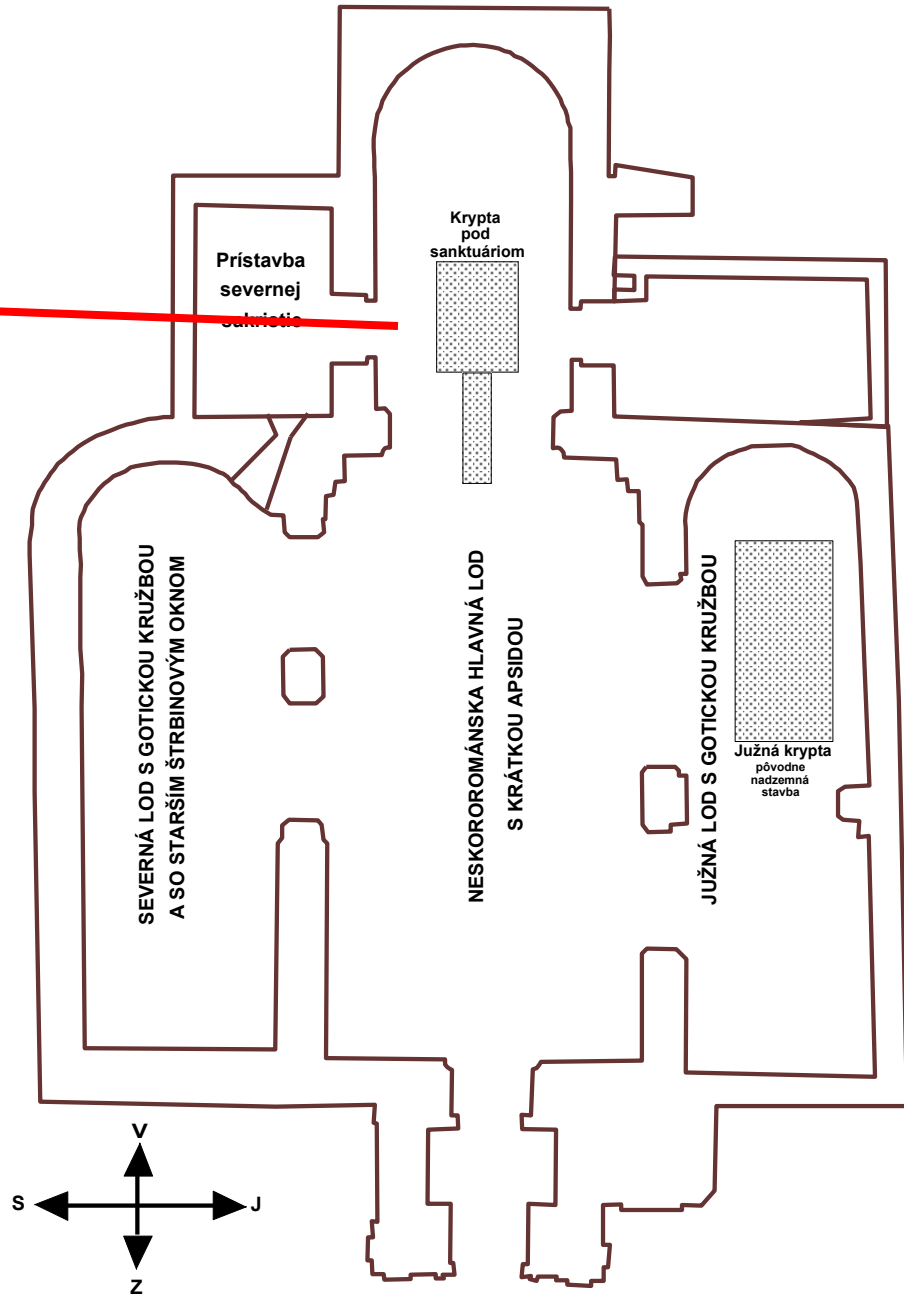
prieskum farského kostola v Devíne



prieskum farského kostola v Devíne

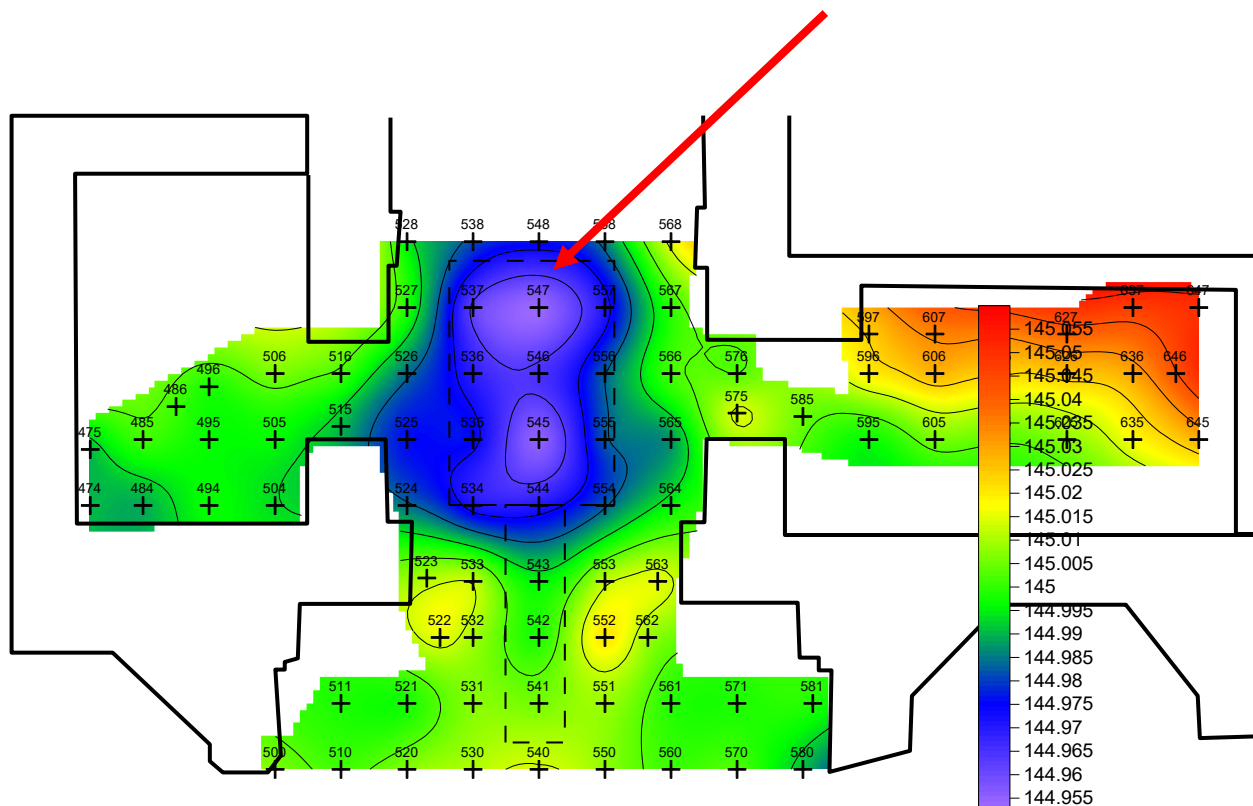


prejav známej krypty



Kostol Najsv. Trojice, Devín

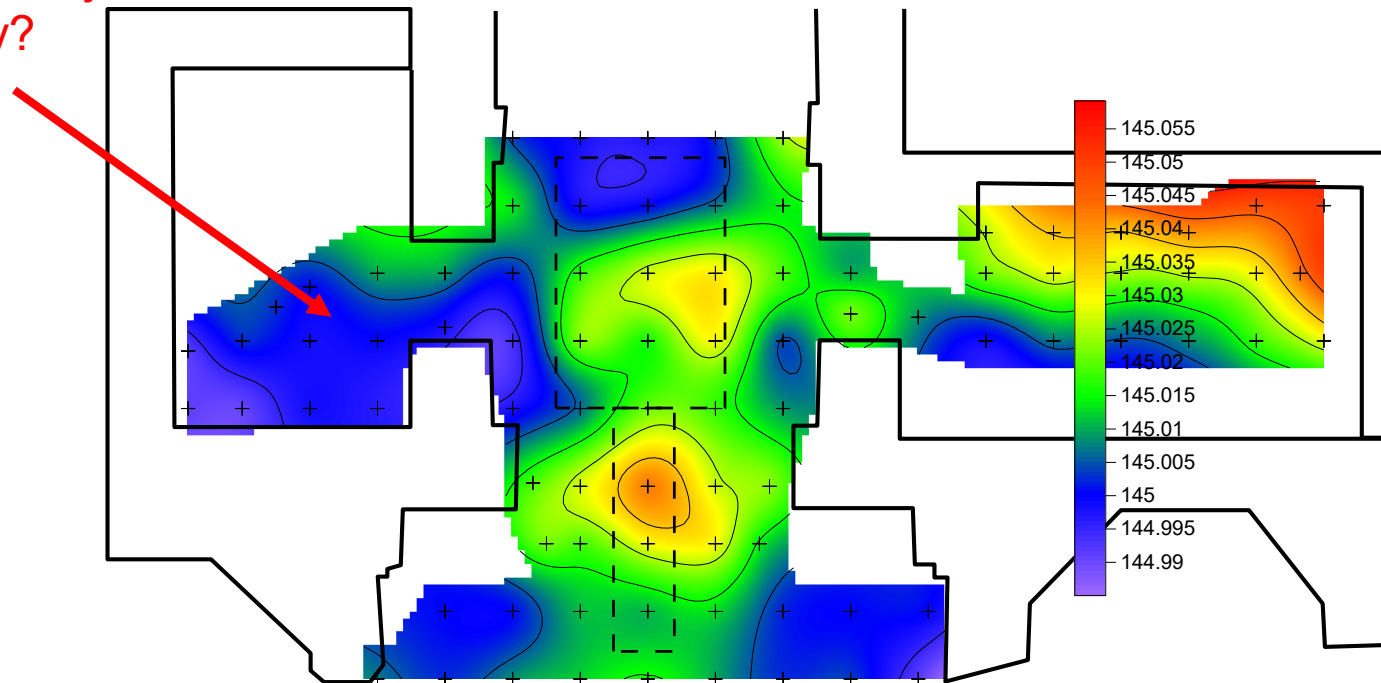
prejav známej krypty



Bouguerove anomálie (so zavedením opráv na účinok múrov) pre $\sigma = 2.0 \text{ g.cm}^{-3}$

Kostol Najsv. Trojice, Devín

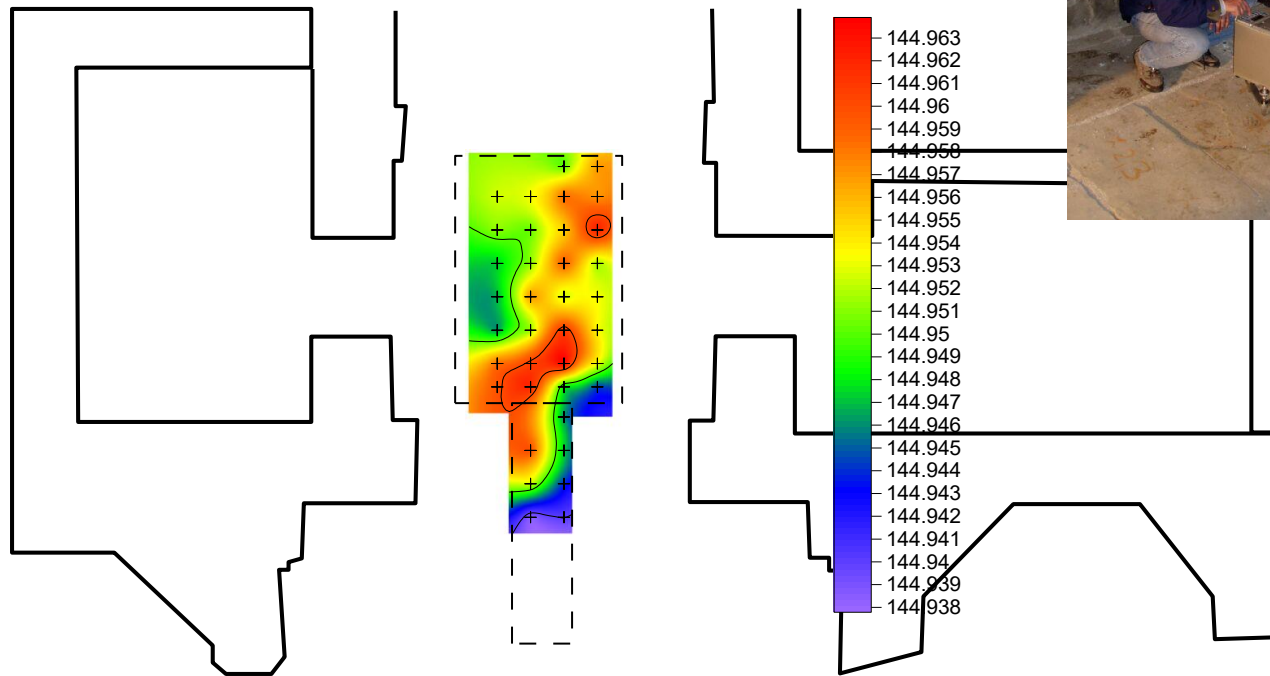
prejav
zasypanej
krypty?



odkryté Bouguerove anomálie (odstránený účinok krypty)

Kostol Najsv. Trojice, Devín

merania dnu v krypte

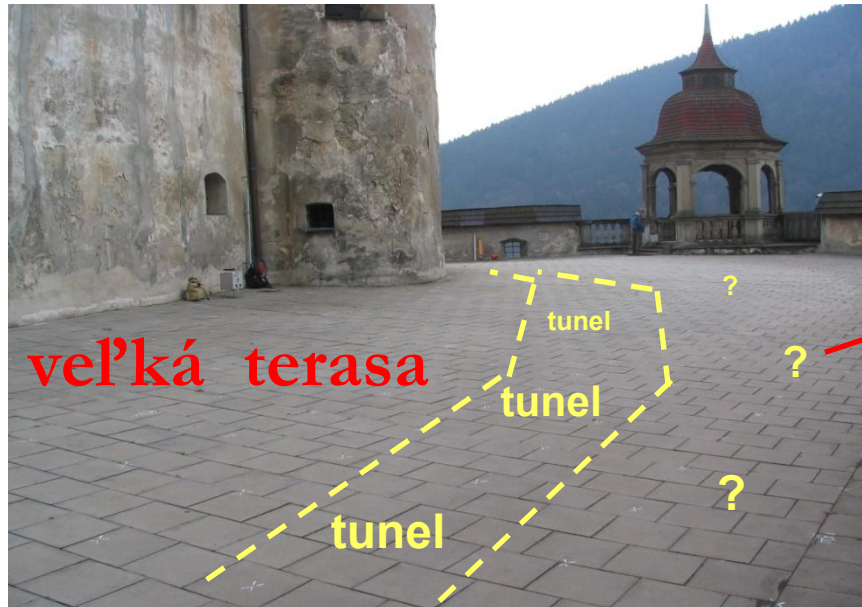


prieskum nepotvrdil prítomnosť dutiny pod existujúcou kryptou,
anomálna zóna v ľavej časti bola spôsobená vrstvami
ľahkých pieskov (overené ručne vŕtanými sondami)

mikrogravimetrický prieskum veľkej terasy Oravského zámku (2005)



študovaná lokalita – veľká terasa Oravského zámku



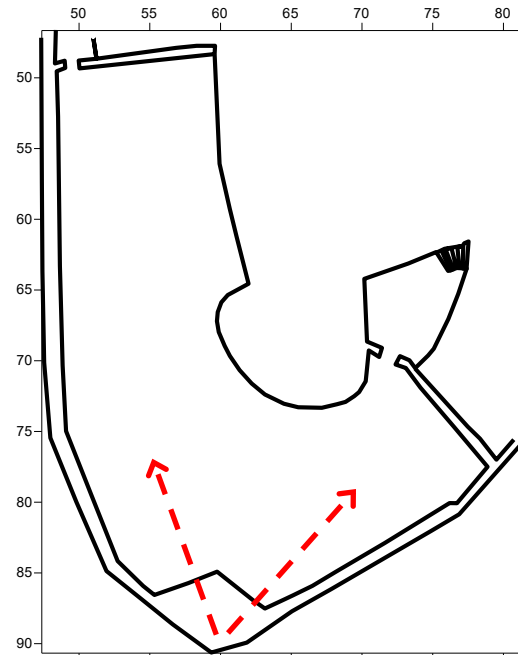
cieľom prieskumu
bolo nájsť možné
prejavy existencie
tzv. kazemát
(spojovacích chodieb
medzi tunelom a
opevnením)



pohľad od
prístupovej
cesty na
zámok



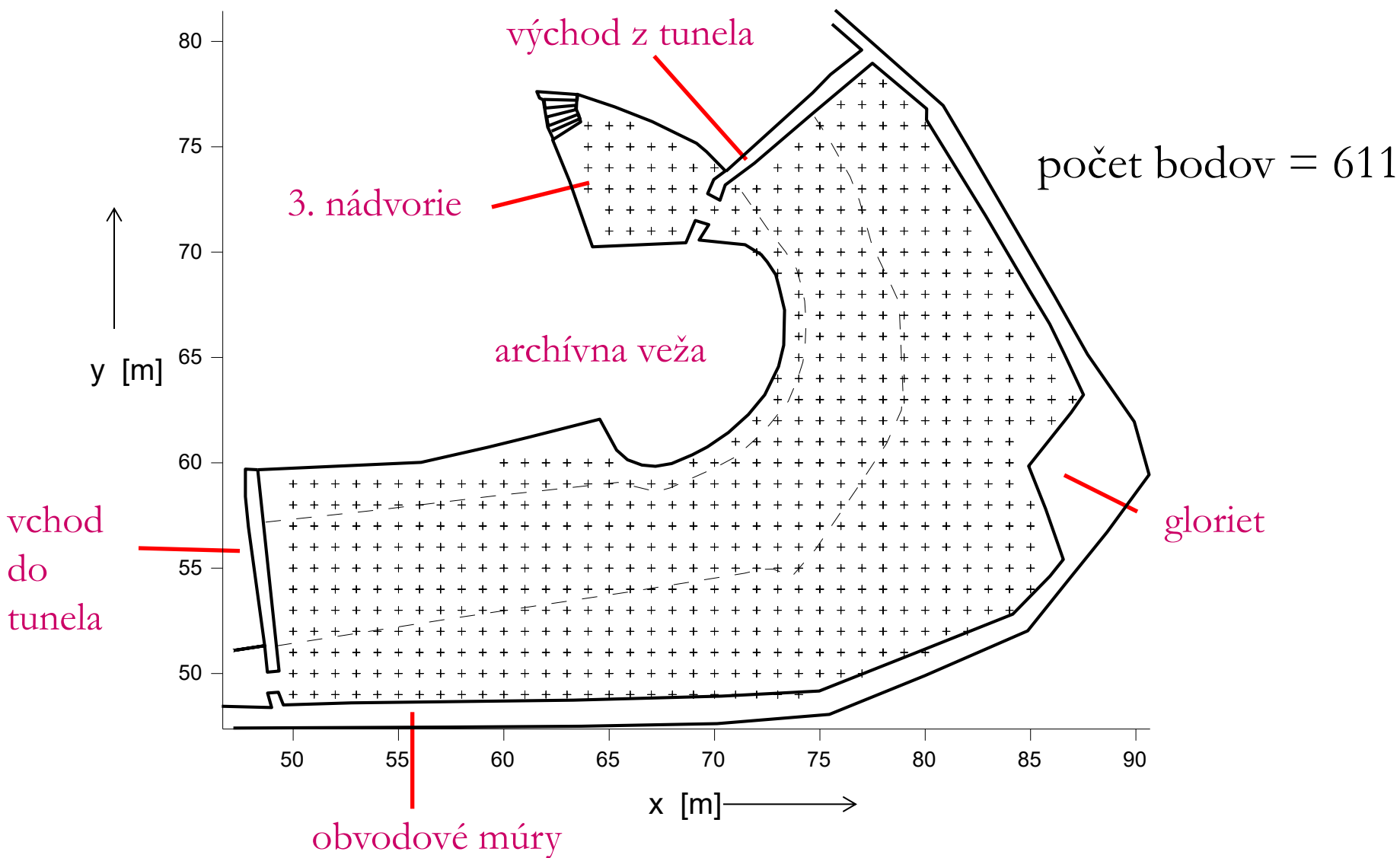
pohľad od altánku
(glorietu) smerom k
prístupovej ceste na
zámok



pohľad od altánku
(glorietu) smerom k
tretiemu nádvoriu

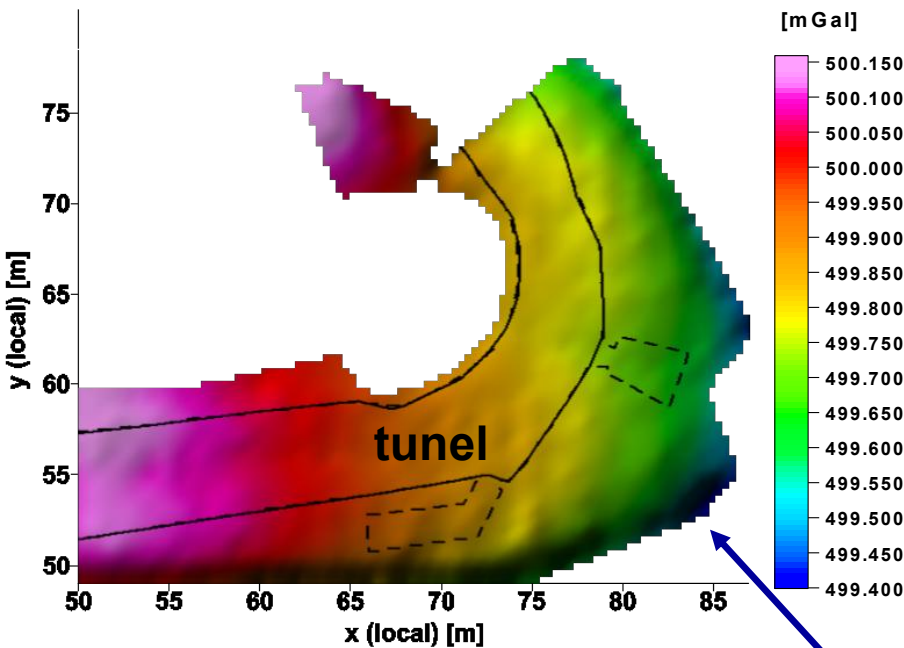
- vymedzenie a vytýčenie meraného územia

siet' bodov 1 x 1 m v lokálnych súradniciach

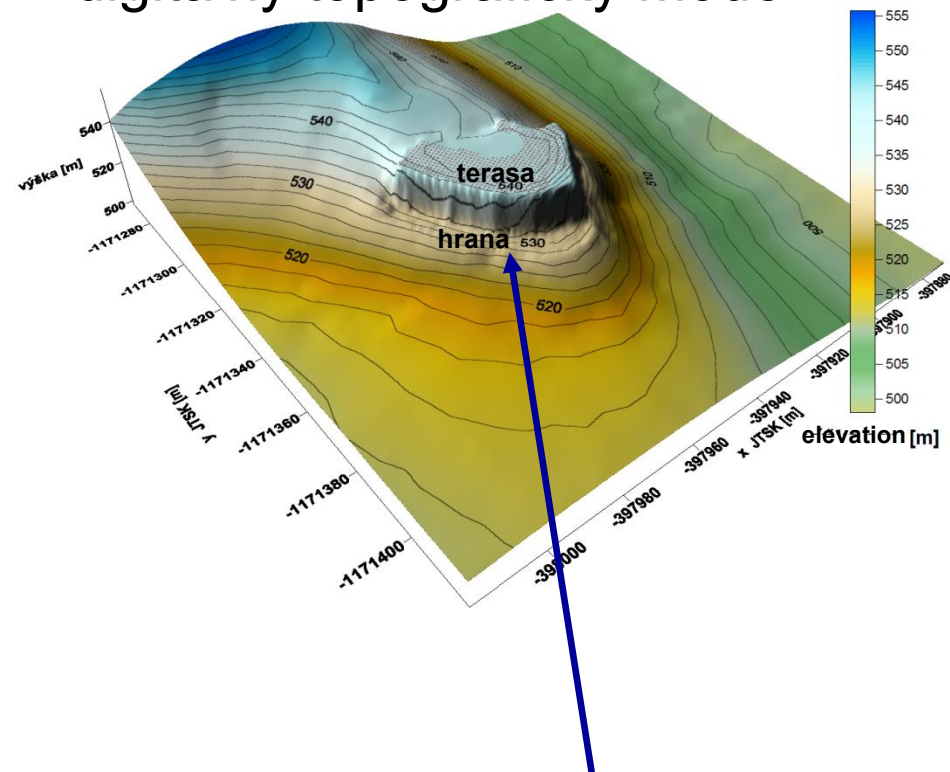


priebeh meraného “g”

merané g

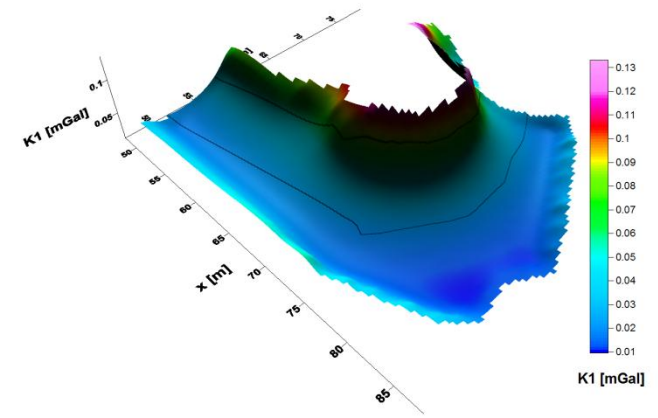
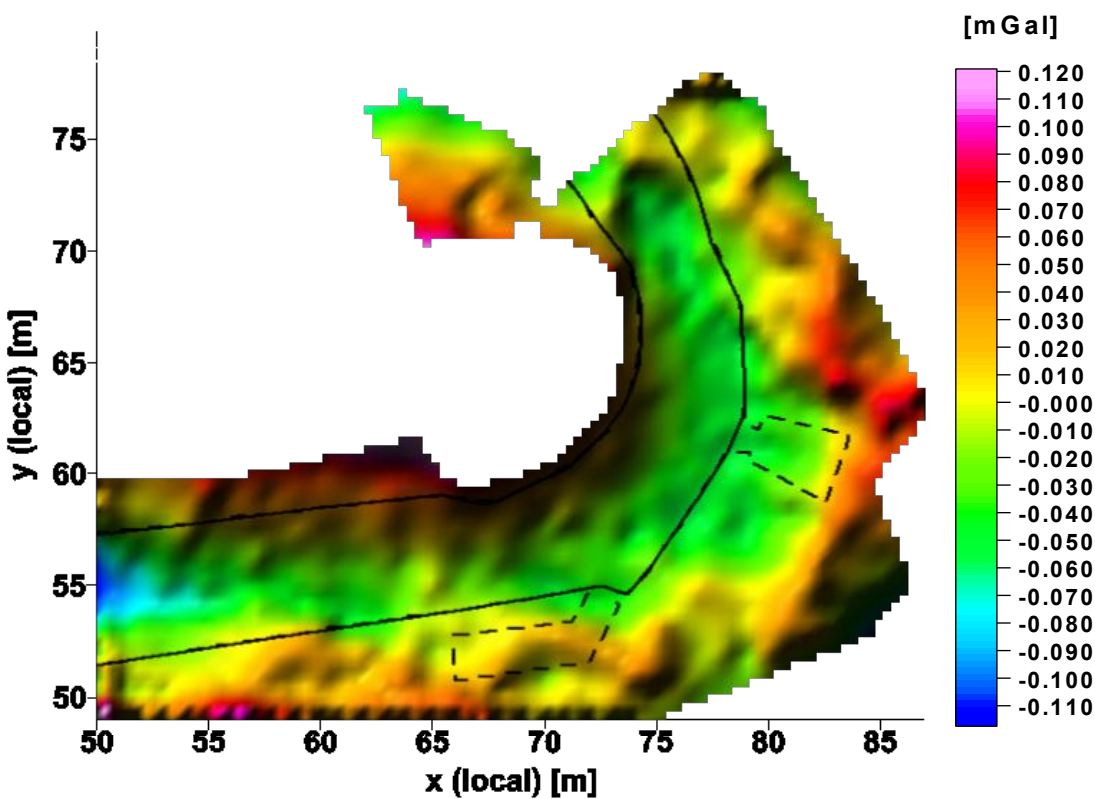


digitálny topografický model



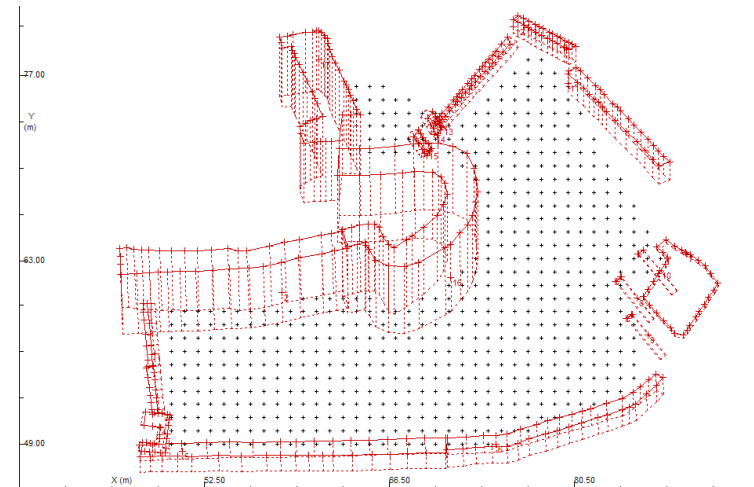
výrazný prejav ostrej hrany za múrmi
(vzduch = chýbajúce hmoty = pokles g)

mapa úplných Bouguerových anomálií



gravitačný efekt múrov

až po aplikovaní všetkých korekcií (aj opravy o gravit. účinnok múrov) sa v mape úplných Bouguerových anomálií prejaví prítomnosť tunelu a ostatných hustotných nehomogenít

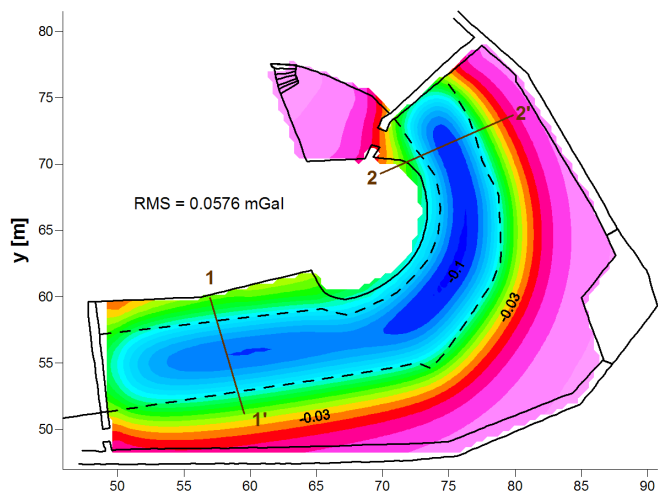
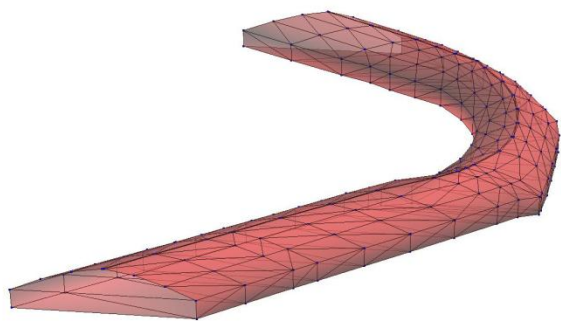


model múrov

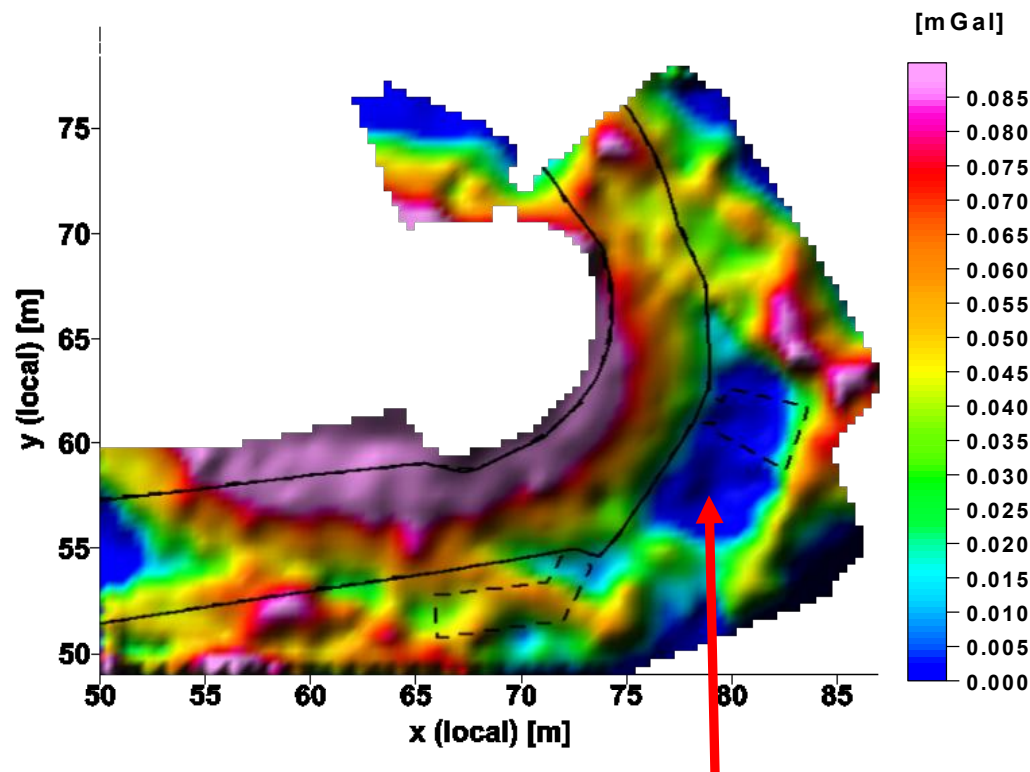
výsledky – Oravský zámok, veľká terasa

**finálny výsledok:
tzv. “odkryté“ Boguerove anomálie
(odstránený prejav tunelu)**

3D model tunelu

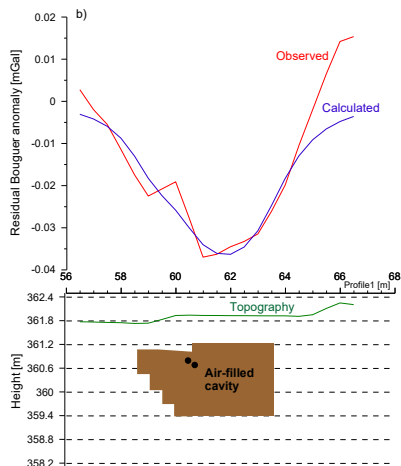
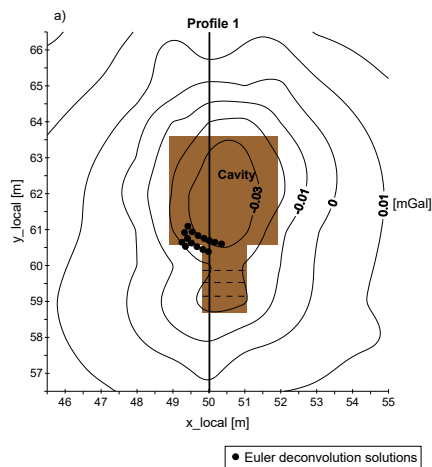


gravitačný efekt tunelu

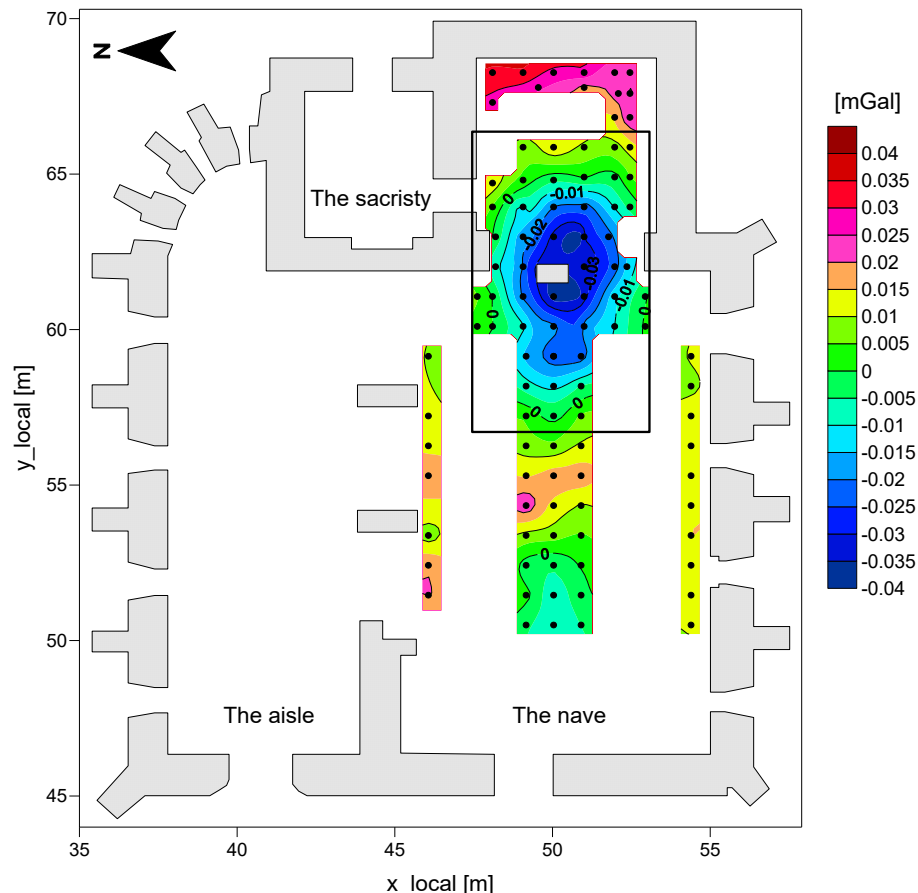


dôležitá anomálna oblasť –
prejav časti kazemát?

výsledky mikrogravimetrického prieskumu kostola Sv. Mikuláša v Pukanci (2008)



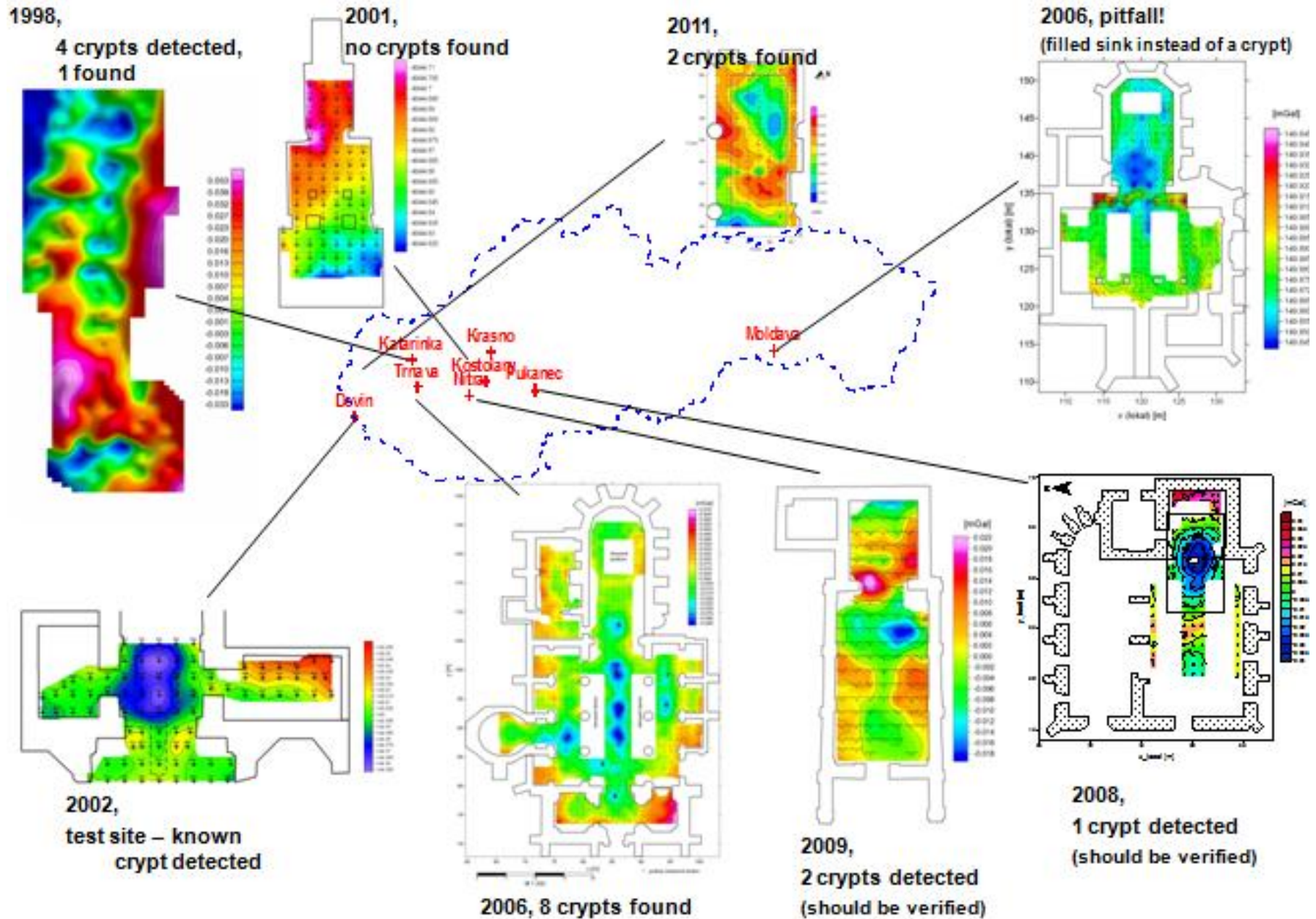
výsledky
Počítačového
modelovania



úplná Bouguerova anomália
(s opravami na účinky múrov)

**anomália nebola
zatiaľ overovaná**

príkladové štúdie (mikrogravimetria) SR

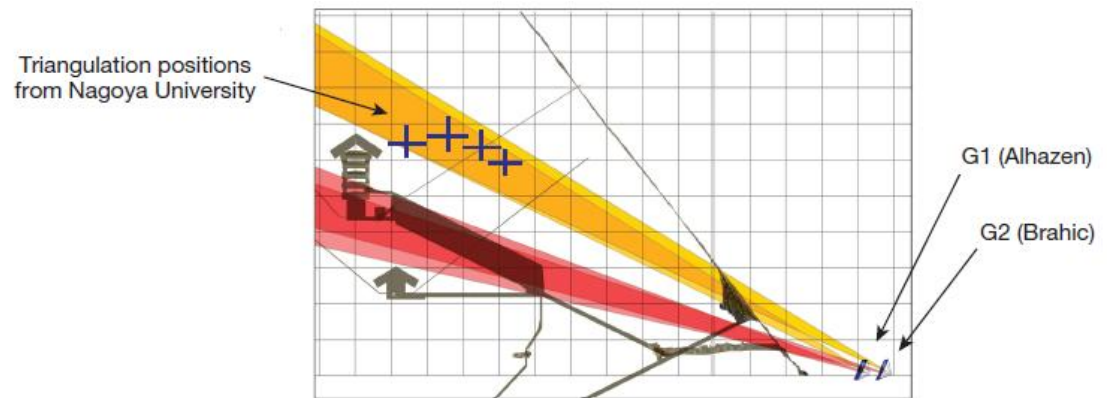
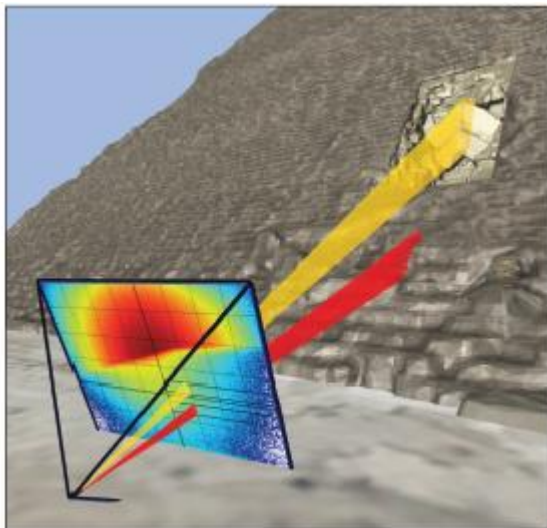
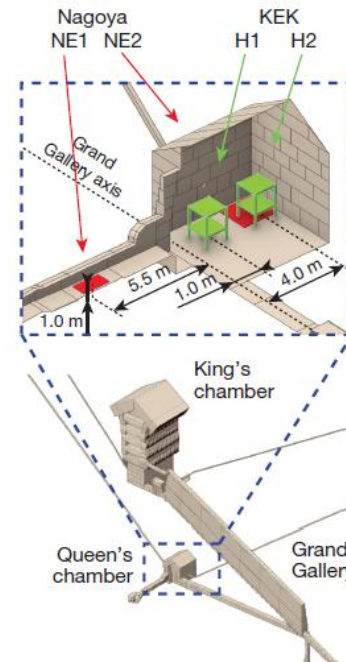


Príkladové štúdie (case-studies) z oblasti archeo-geofyziky: mikrogravimetria

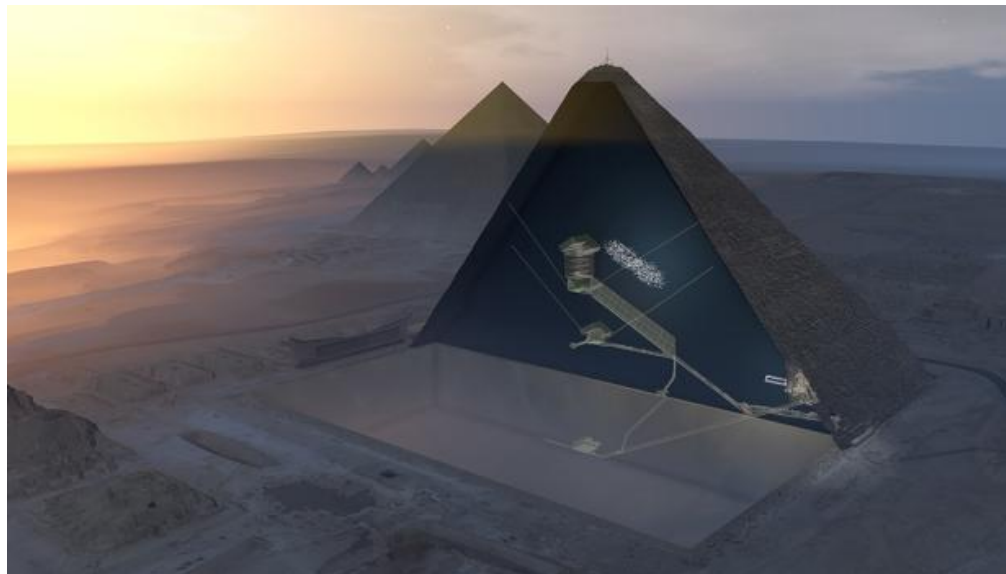
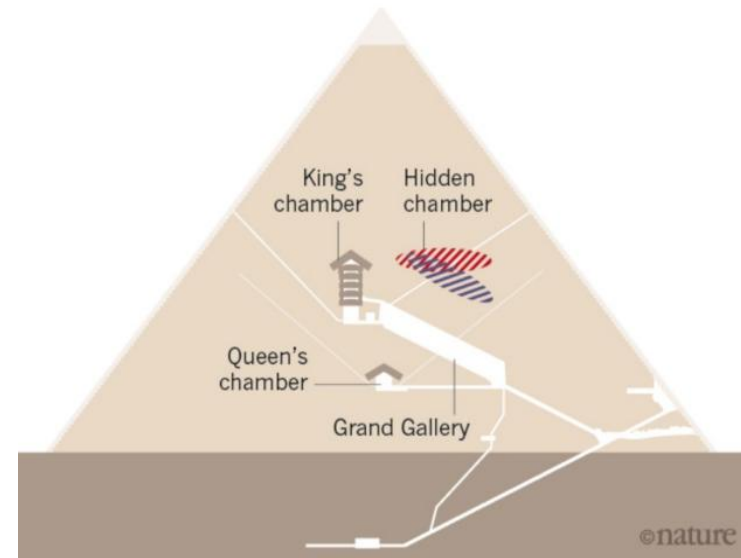
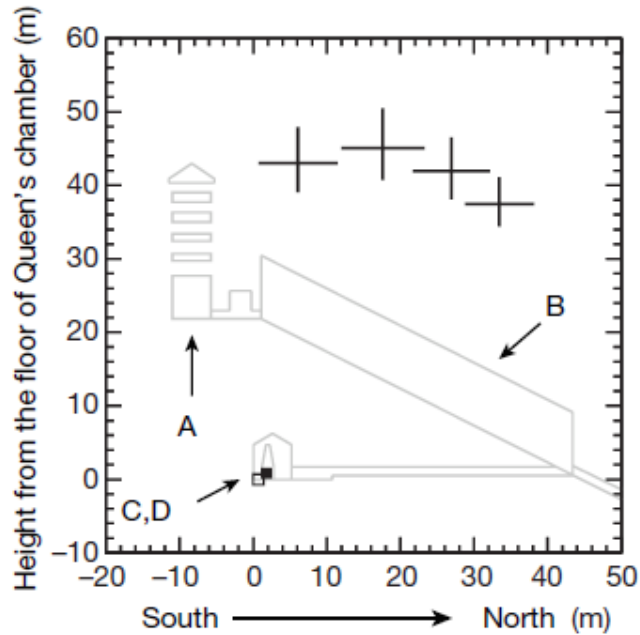
ZÁVERY

- mikrogravimetria sa používa najmä na vyhľadávanie dutín (krypty, pivnice, väčšie hrobky, jaskyne, chodby, tunely, ...)
- veľkosť detekovaných dutín: objemy rádovo desiatky m³
- dôraz na presné merania a zameranie polôh bodov
- veľmi dôležité sú opravy o účinky múrov
- najlepšie je mikrogravimetriu kombinovať s georadarom (niekedy môžu byť interpretované aj iné ľahké objekty [zasypané jamy , pieskové duny, atď'.] nesprávne ako dutiny)

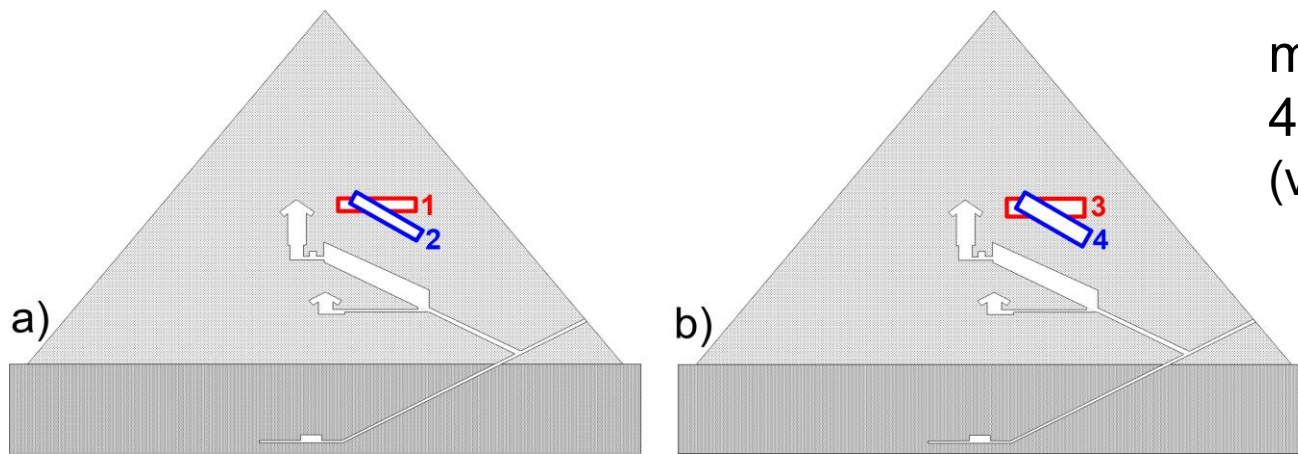
Zaujímavosť – objavenie novej dutiny (tzv. Big Void) v Cheopsovej pyramíde pomocou registrácie kozmického žiarenia (muóny).



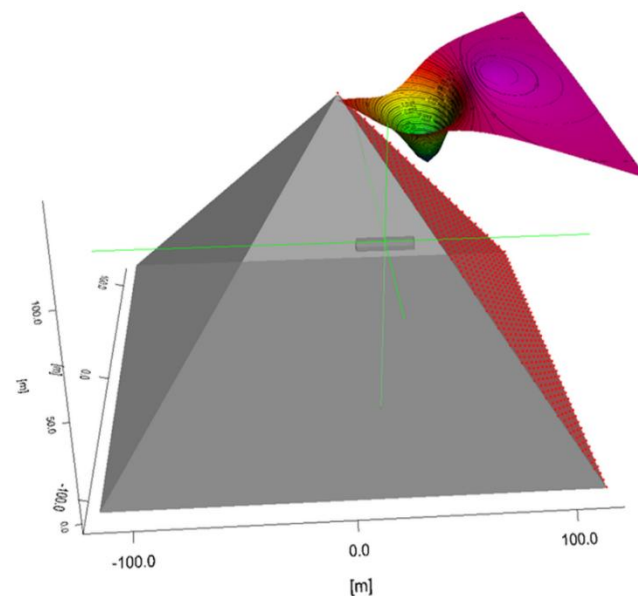
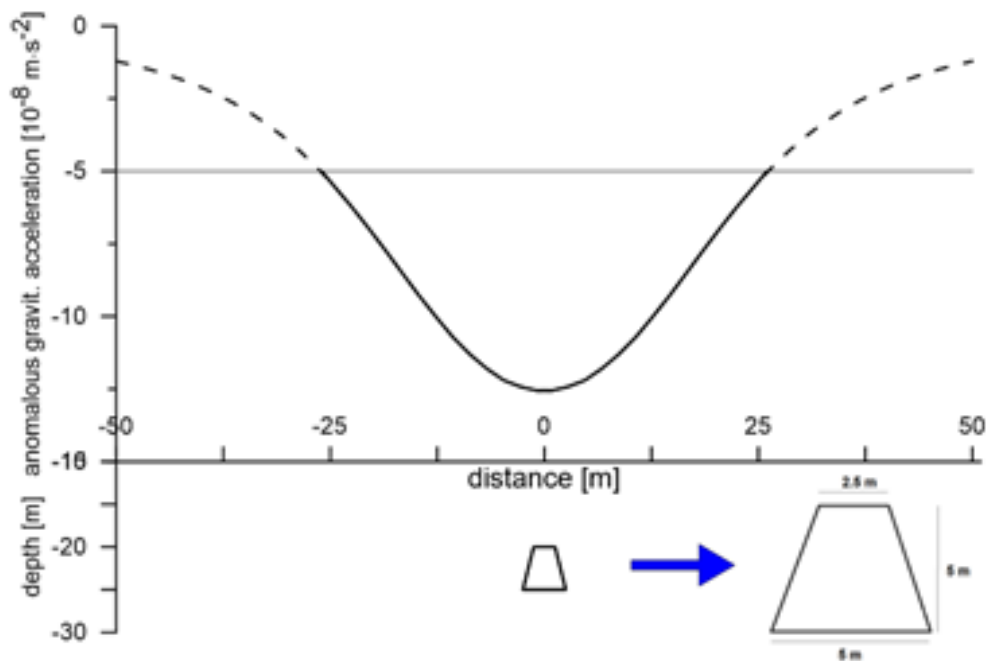
Zaujímavosť – objavenie novej dutiny (tzv. Big Void) v Cheopsovej pyramíde pomocou registrácie kozmického žiarenia (muóny).



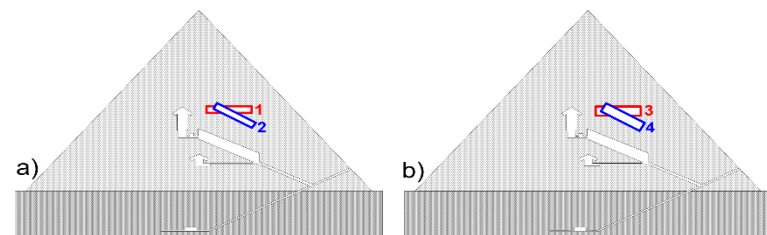
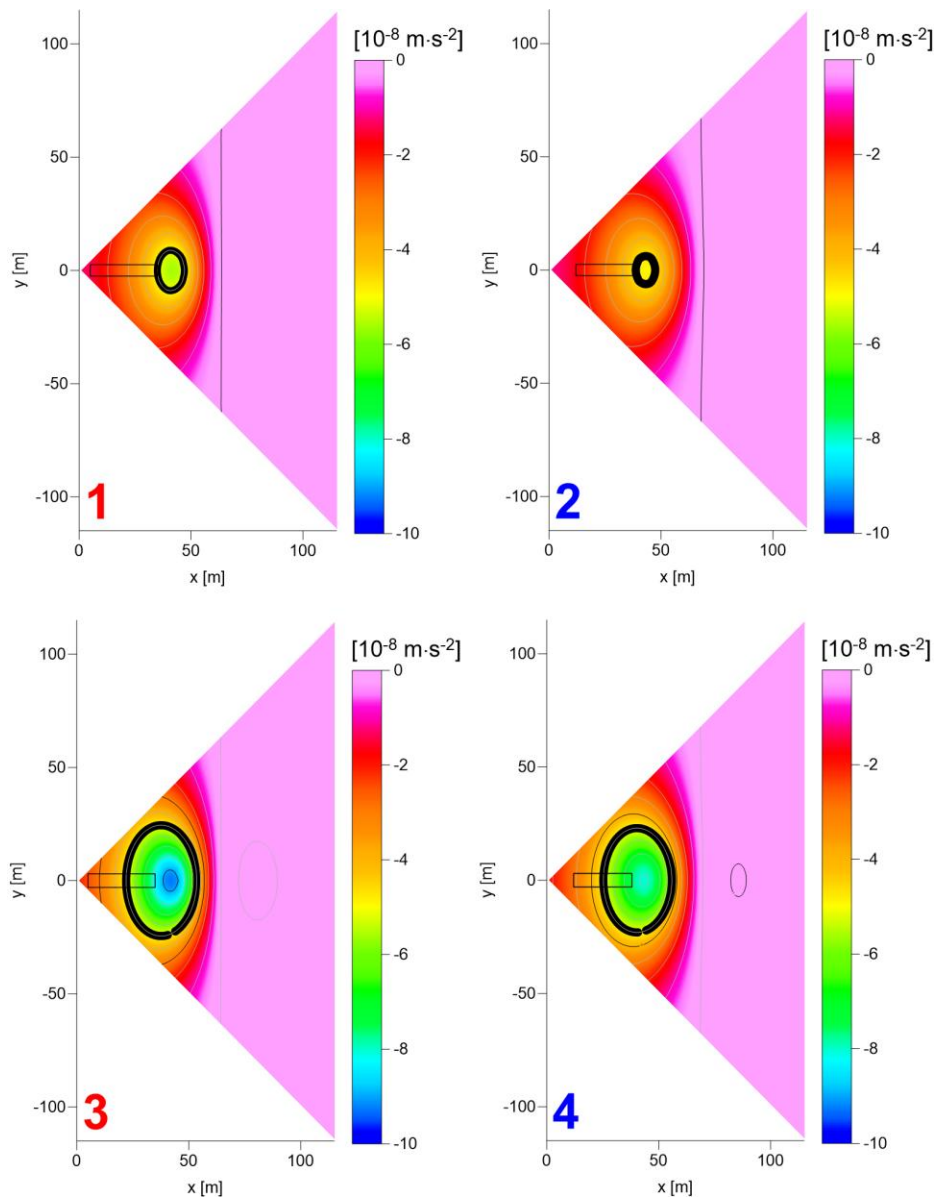
Zaujímavosť – objavenie novej dutiny (tzv. Big Void) v Cheopsovej pyramíde pomocou registrácie kozmického žiarenia (muóny).



modelované
4 scenáre
(výška 5 a 7 m)



Zaujímavosť – objavenie novej dutiny (tzv. Big Void) v Cheopsovej pyramíde pomocou registrácie kozmického žiarenia (muóny).



Hrubá izočiara približne vymedzuje plochu, na ktorej by mohla byť daná dutina „merateľná“ pomocou súčasných moderných gravimetrov.



ELSEVIER

Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

Journal of Archaeological Science: Reports

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jasrep



The discovery of the “muons-chamber” in the Great pyramid; could high-precision microgravimetry also map the chamber?

R. Pašteka^{a,*}, P. Zahorec^b, J. Papčo^c, J. Mrlina^d, H.-J. Götze^e, S. Schmidt^e

^a Department of Engineering Geology, Hydrogeology and Applied Geophysics, Faculty of Natural Sciences, Comenius University, Ilkovičova 6, 842 48 Bratislava, Slovak Republic

^b Division of Geophysics, Earth Science Institute of the Slovak Academy of Sciences, Dúbravská cesta 9, 840 05 Bratislava, Slovak Republic

^c Department of Theoretical Geodesy and Geoinformatics, Faculty of Civil Engineering, Slovak University of Technology, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovak Republic

^d Institute of Geophysics of the Czech Academy of Sciences, Boční II/1401, 141 31 Prague 4, Czech Republic

^e Department of Geophysics, Institute for Geosciences, Christian-Albrechts University, Otto-Hahn-Platz 1, 24118 Kiel, Germany

ARTICLE INFO

Keywords:

Pyramid chamber
3D gravity model
Microgravity measurement
Muon scanning
Big Void
Archaeogeophysics

ABSTRACT

In this study we have investigated the question as to whether highly accurate microgravimetric measurements on the side of a pyramid could also map the recently discovered “muon chamber” in the Great Pyramid of Giza in Egypt. Exploiting the technical capabilities of modern gravimeters, we performed three-dimensional model calculations with realistic model parameters obtained from published literature. Under ideal experimental conditions researchers are able to measure relatively small gravity effects around $-1 \times 10^{-7} \text{ ms}^{-2}$. However, to transfer the model scenario to investigating the real-world pyramid chamber we need to know what the chamber may contain – such knowledge can help in estimating a more realistic result.