



Klub učiteľov geovied,
odborná skupina pri Slovenskej geologickej spoločnosti SAV

Príspevok geofyziky pri lokalizácii archeologických objektov

pojednanie o metódach, ktoré merajú a vyhodnocujú
fyzikálne polia Zeme a tak „pozerajú“ pod jej povrch

R. Pašteka, Katedra inžinierskej geológie, hydrogeológie a
aplikovanej geofyziky, PriF UK Bratislava

Príspevok geofyziky pri lokalizácii archeologických objektov

Motivácia:

- geofyzika = typická interdisciplinárna (fascinujúca) veda,
- zaujímavé aplikačné oblasti (archeológia, kriminalistika...),
- veľké možnosti pri ochrane a digitalizácii kultúrneho dedičstva.



Príspevok geofyziky pri lokalizácii archeologických objektov

Obsah:

- geofyzikálne polia,
- odvetvia geofyziky podľa meraných polí,
- príkladové štúdie z oblasti archeológie.

geofyzika

Interdisciplinárne odvetvie, ktoré sa zaoberá meraním, spracovaním a interpretáciou fyzikálnych polí Zeme:

- magnetického poľa (magnetometria),
- tiažového poľa (gravimetria),
- elektrických polí (geoelektrika),
- mechanického vlnového poľa (seizmika),
- atď. (napr. tepelného poľa, prirodzenej rádioaktivity)

geofyzika - teoretická a aplikovaná,

v meraných geofyzikálnych poliach sa často prejavuje prítomnosť nehomogenít = záujmových objektov

– v oblasti geológie, ekológie, inžinierstva, archeológie, ...
(pochované zvyšky múrov, staré priekopy, hroby, krypty, ...)

geofyzika

Zdroje fyzikálnych polí Zeme:

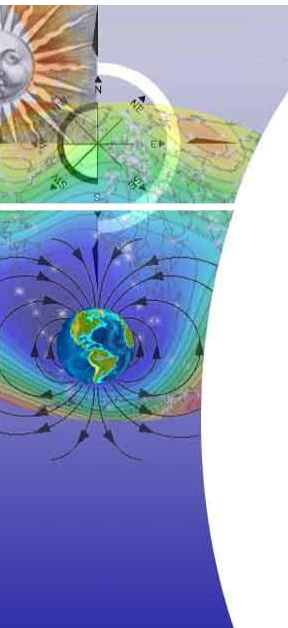
prírodné

magnetické pole Zeme,
ťažové pole Zeme,
búrky, zemetrasenia ...

umelé

väčšinou tvoria súčasť
geofyzikálnych prístrojov

- okrem zdrojov polí sú dôležité tiež **fyzikálne vlastnosti prírodného a antropogénneho prostredia**, ktoré tieto polia deformujú (vytvárajú tak anomálie geof. polí),
- cieľom je aplikovanej geofyziky je interpretovať deformácie (**anomálie**) týchto polí za účelom detekcie záujmových objektov,
- získané údaje sa zobrazujú do grafov alebo máp (často sa využíva ČB farebná škála).



geofyzika

prístroje a princípy merania:

postavené na rôznych mechanizmoch interakcie fyzikálneho poľa s určitým senzorom



Príspevok geofyziky pri lokalizácii archeologických objektov

Obsah:

- geofyzikálne polia,
- odvetvia geofyziky podľa meraných polí,
- príkladové štúdie z oblasti archeológie.

geofyzika

Najpoužívanéjšie geofyzikálne metódy v archeológii:

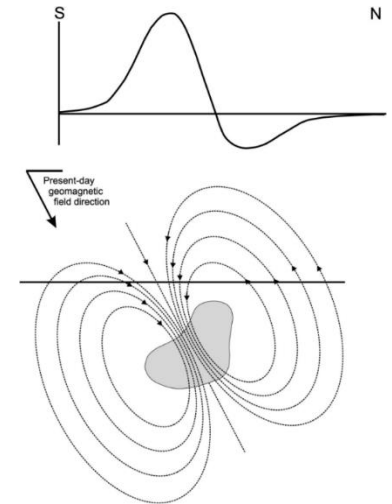
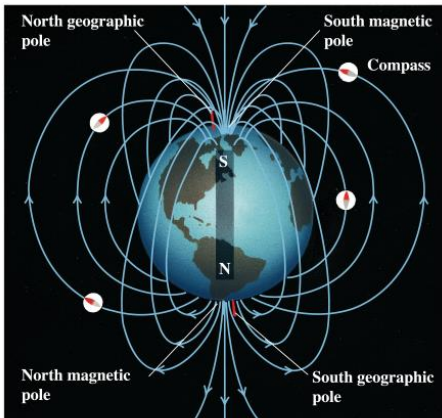
- magnetometria,
- geoelektrika (georadar),
- mikrogravimetria,
- seizmika,
- rádiometria,
- geotermika.

Najvhodnejšia je kombinácia viacerých metód (navzájom sa dopĺňajú alebo si odporujú).



magnetometria

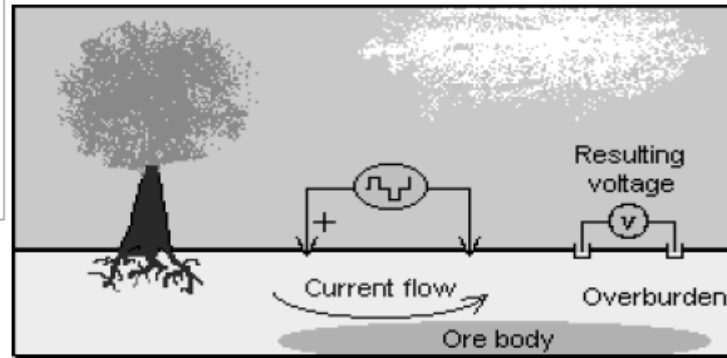
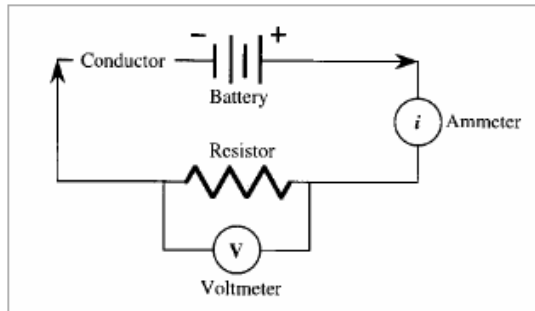
- založená na presnom meraní magnetického poľa Zeme,
- princípy prístrojov (magnetometre) sú založené na rôznych efektoch pôsobenia vonkajšieho magnetického poľa na správanie sa atómov,



- meraná veličina:
 - magnetická indukcia (jednotka: Tesla),
- anomálie majú dipolový charakter a sú detegované nad objektami s vyššou magnetizáciou (susceptibilitou).

geoelektrika (ERT)

- založená na meraní efektu jednosmerného elektrického prúdu zavedeného do horninového prostredia (aplikácia Ohmovho zákona),
- princíp merania: meraný elektrický prúd a napätie,

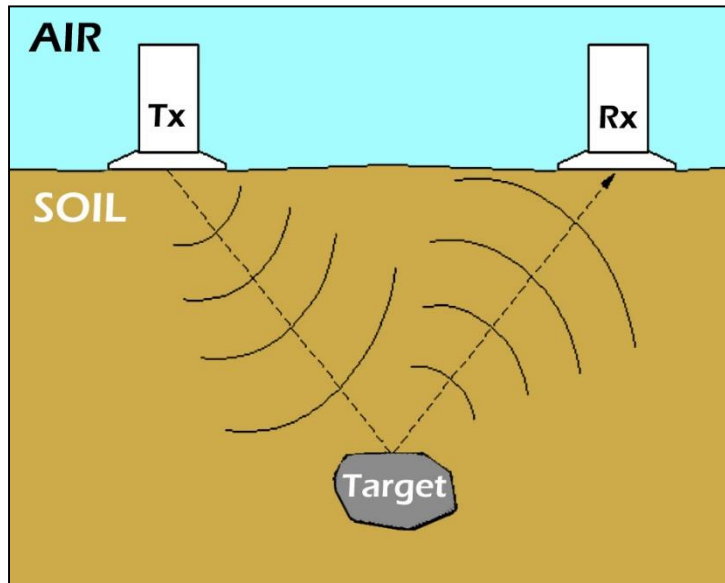


- hodnoty sú prepočítané na tzv. zdanlivý merný elektrický odpor (jednotka: $\Omega \cdot m$),
- anomálie sú detekované nad objektami s rôznou elektrickou vodivosťou/odporom.

georadar (GPR)

- založená na registrovaní odrazených el-mag. vln od podpovrchových objektov (frekvencia: rádovo stovky MHz)
- hĺbkový dosah: 5-6 m

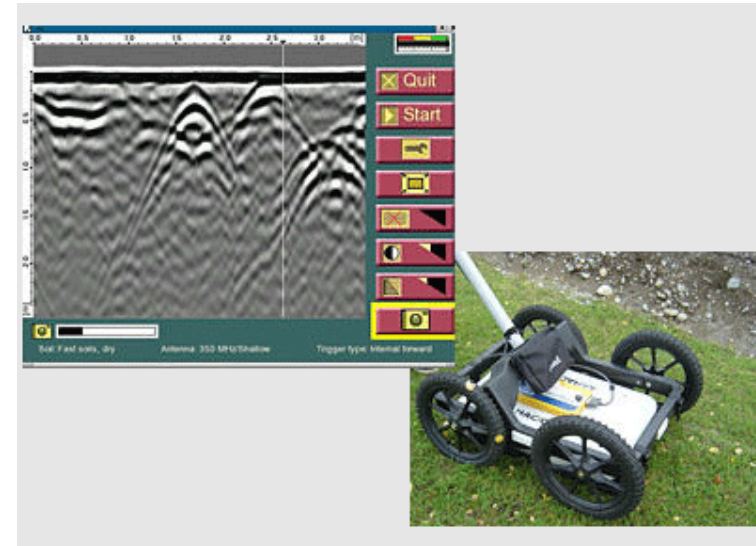
Vysielač
Tx



Prijímač
Rx

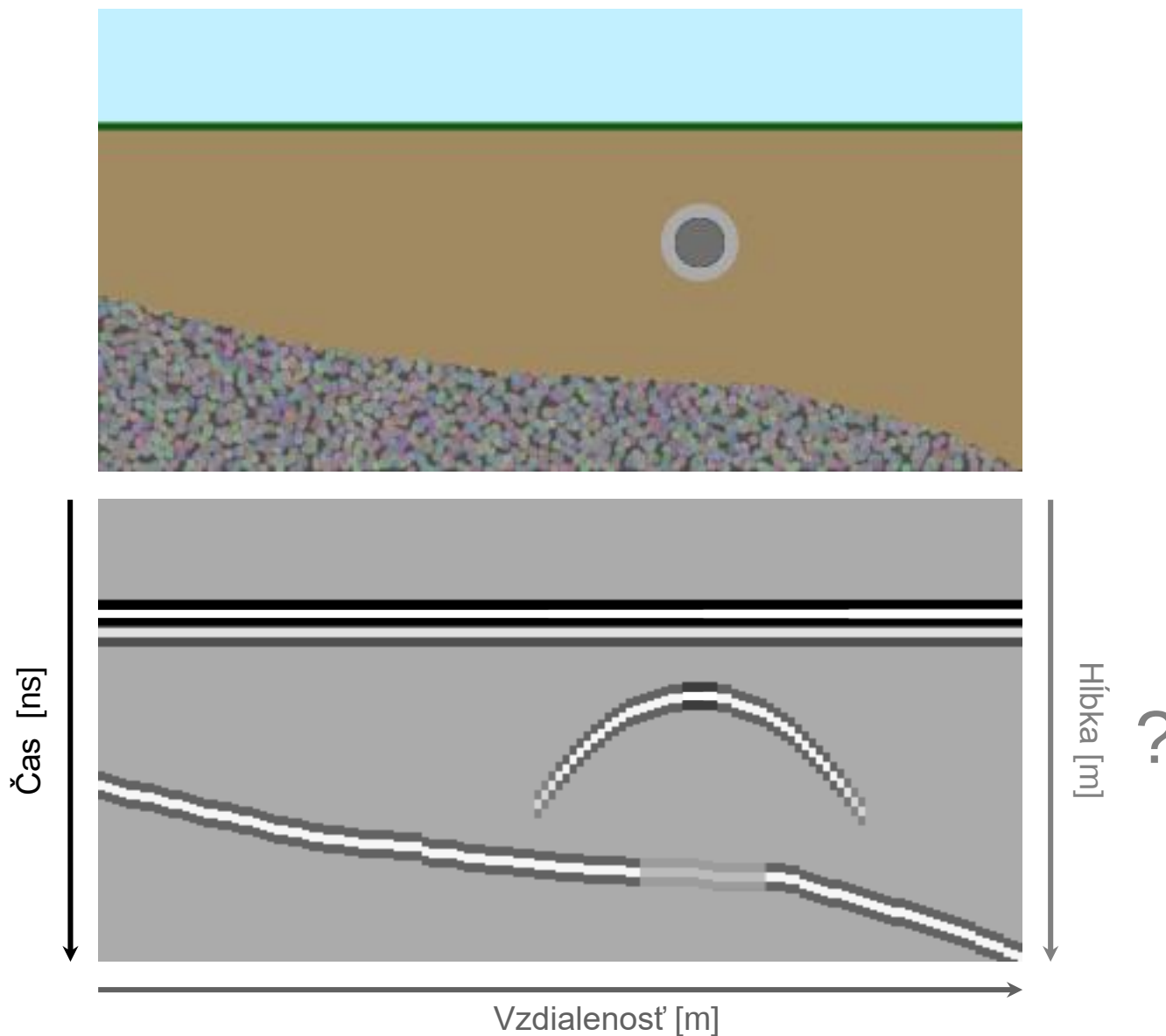
GPR = ground
penetrating radar

- výsledkom sú tzv. radarogramy (vertikálne a horizontálne),
- anomálie sú detekované nad objektami s rôznou elektrickou vodivosťou a permitivitou.



georadar (GPR)

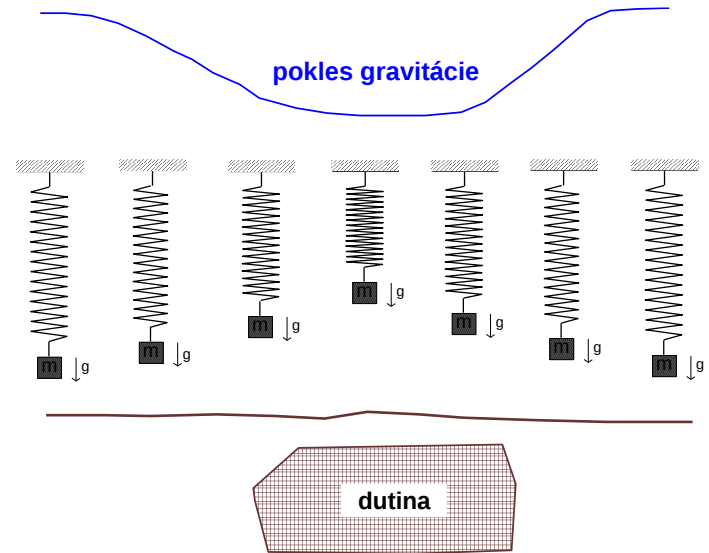
**Vytváranie
radargramu**



GPR = ground penetrating radar

gravimetria

- založená na presnom meraní tiažového zrýchlenia Zeme,
- prístroje (gravimetre) sú založené na princípe veľmi presných váh (kremenná pružinka sa natiahne úmerne tiaž. zrýchleniu),
- odstraňujú sa všetky „neužitočné“ vplyvy,
- tvoria sa mapy tiažových anomálií,
- sú detegované objekty s rozdielnou hustotou (napr. dutiny – prejavujú sa zníženými hodnotami).



DPZ (diaľkový prieskum Zeme)

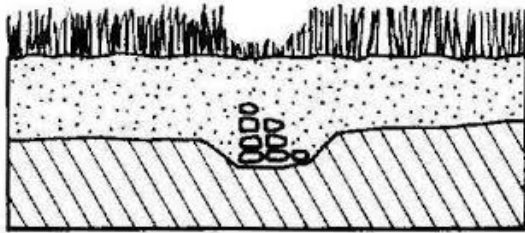
okrem geofyzikálnych metód sú veľmi dôležité aj metódy DPZ

- letecké snímkovanie: “zimná” (sfarbenie pôdy) a “letná” fotografia (porastové príznaky)

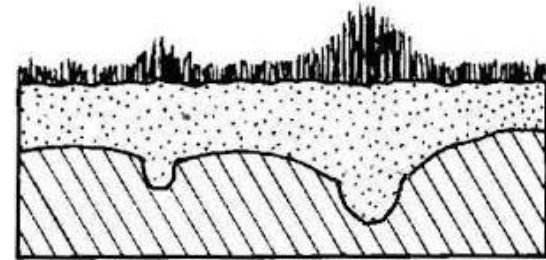


DPZ (diaľkový prieskum Zeme)

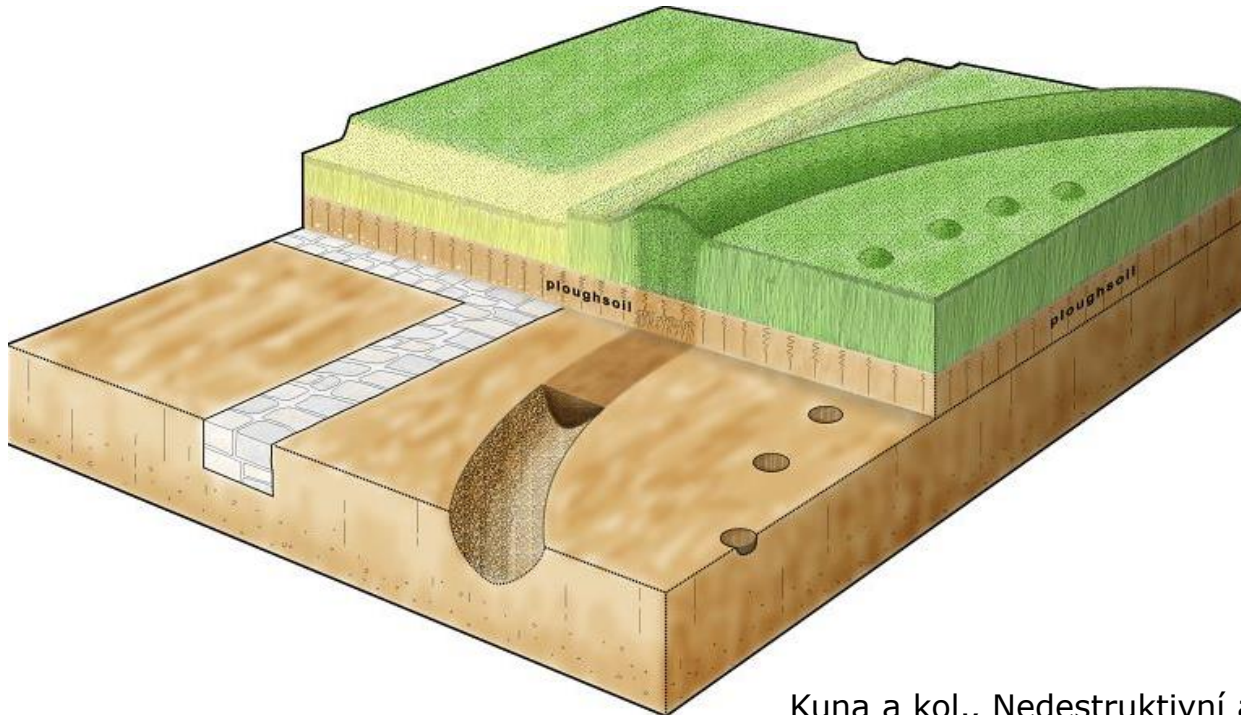
- porastové príznaky



zvyšky
múrov



bývalé
priekopy



DPZ (diaľkový prieskum Zeme)

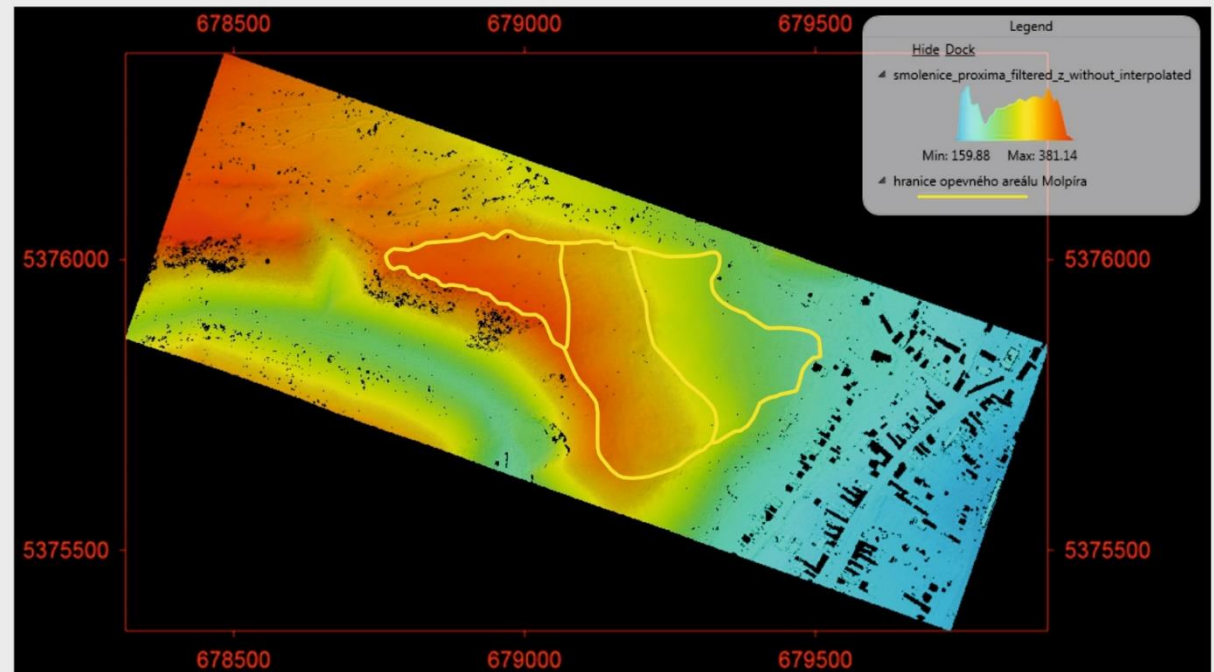
- metóda LiDAR (Light Detection and Ranging)

Airborne laser scanning

Point cloud acquired by airborne laser scanning

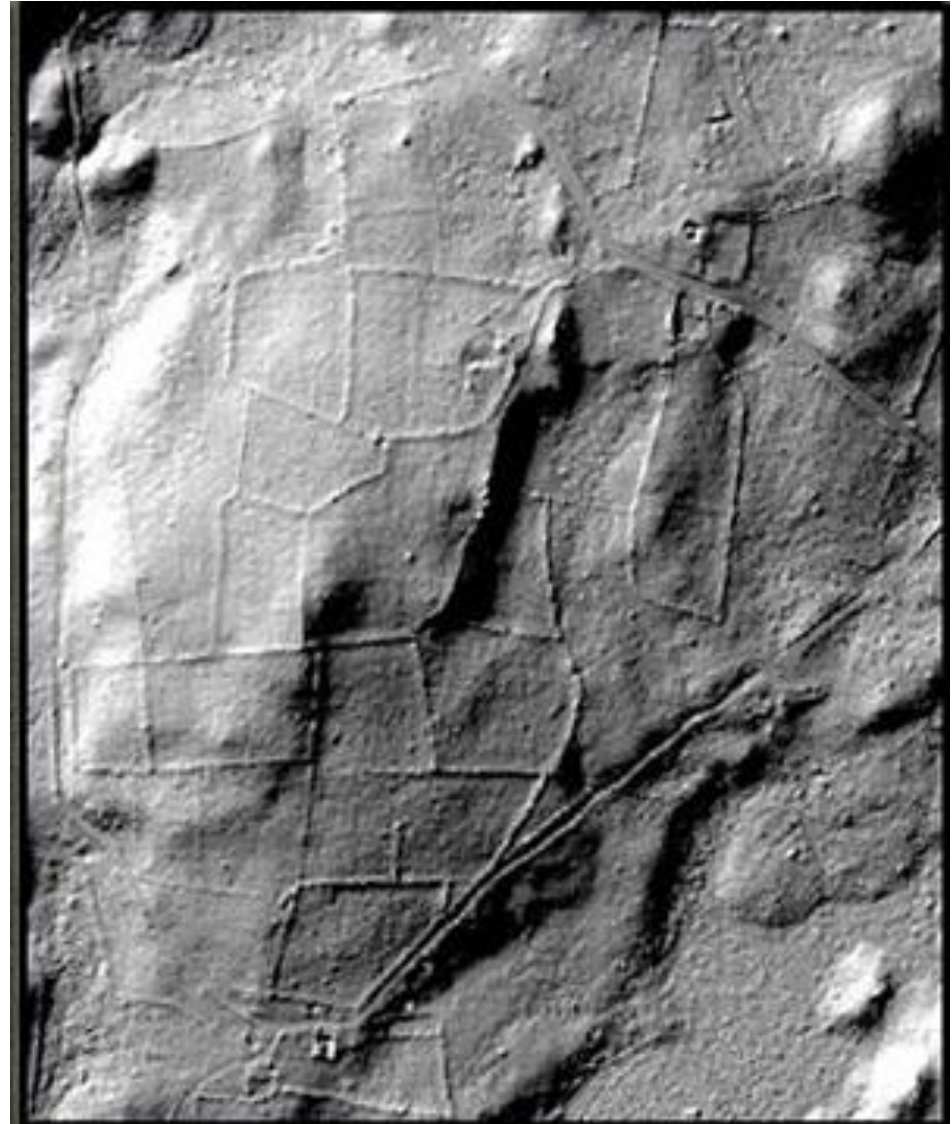
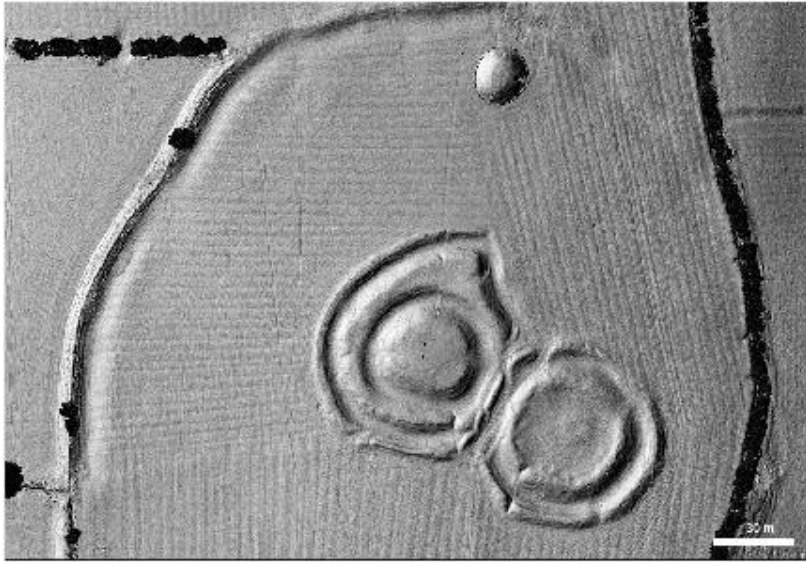
	Average density of points on m ²	Average distance between points in m
All points represent ground model	66.63	0.122
	21.07	0.215

- grid of absolute altitudes
with amount of pixel 0.1 m
- the border of fortified area
of hillfort is marked with
yellow line



DPZ (diaľkový prieskum Zeme)

- metóda LiDAR (Light Detection and Ranging)



Príspevok geofyziky pri lokalizácii archeologických objektov

Obsah:

- geofyzikálne polia,
- odvetvia geofyziky podľa meraných polí,
- príkladové štúdie z oblasti archeológie.

Príspevok geofyziky pri lokalizácii archeologických objektov

PRÍKLADOVÉ ŠTÚDIE:

- využitie magnetometrie za účelom identifikovania rôznych objektov (tzv. rondelov, mohýl, sídliskových štruktúr, žiarovísk),
- využitie elektrickej rezistívnej tomografie a georadaru pri určení zvyškov murovanej architektúry (v kombinácii s inými metódami),
- využitie gravimetrie s cieľom detekcie dutín (kostoly v Tovačove, Trnave, Bratislave...
a aj prieskum vnútra Cheopsovej pyramídy).

Magnetometria

hlavné oblasti použitia:

1. vyhľadávanie **železných objektov** - výrazné dipólové anomálie (vhodná je kombinácia s detektormi kovov)
- ale pozor (!) nedajú sa rozlíšiť od recentných Fe-objektov,
2. detekcia **bývalých priekop, jám**, atď. – vyplnené objekty hlinou s vyšším obsahom humusu (humus je “magnetickejší” oproti iným typom pôd),
3. vyhľadávanie **starých žiarovísk**, pecí, ohnísk, atď. (dlhšie pôsobiaci oheň zmagnetizuje podložné horniny – „vpáli” do nich aktuálne magnetické pole Zeme),
4. detekcia **sídliskových a pohrebných štruktúr** - rôzne objekty majú často rôznu magnetickú susceptibilitu (vhodná je kombinácia s geoelektr. metódami a radarom).

bývalé priekopy a jamy sú vyplnené hlinou a humusom, ktorý má vysoký obsah magnetických minerálov (vznikli pôsobením tzv. magnetotaktických baktérií)

príklad odkrytej priekopy:



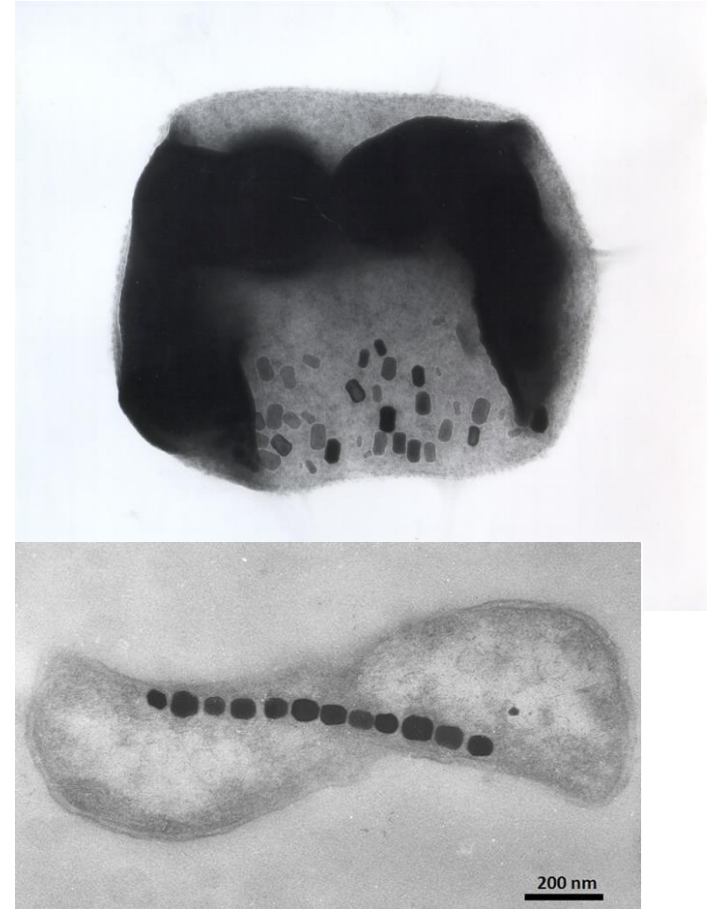
pohľad v reze



pohľad zvrchu

tieto miesta s vyššou koncentráciou magnetických minerálov ovplyvňujú zemské magnetické pole – zvyšujú jeho anomálne hodnoty

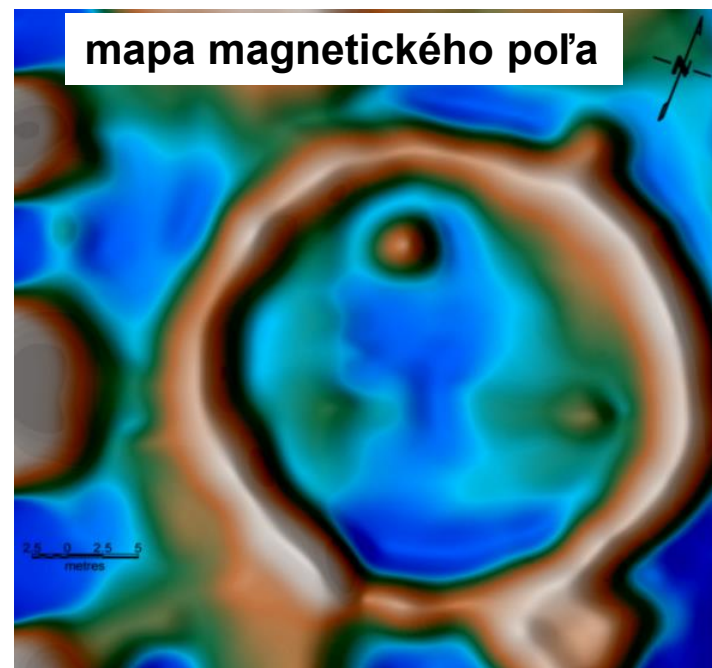
bývalé priekopy a jamy sú vyplnené hlinou a humusom, ktorý má vysoký obsah magnetických minerálov (vznikli pôsobením tzv. magnetotaktických baktérií)



Výsledok pôsobenia magnetotaktických baktérií pri spracovaní rastlinnej zelenej zložky na humus: vznik drobných nano-kryštálikov magnetitu.



snímka z letného obdobia



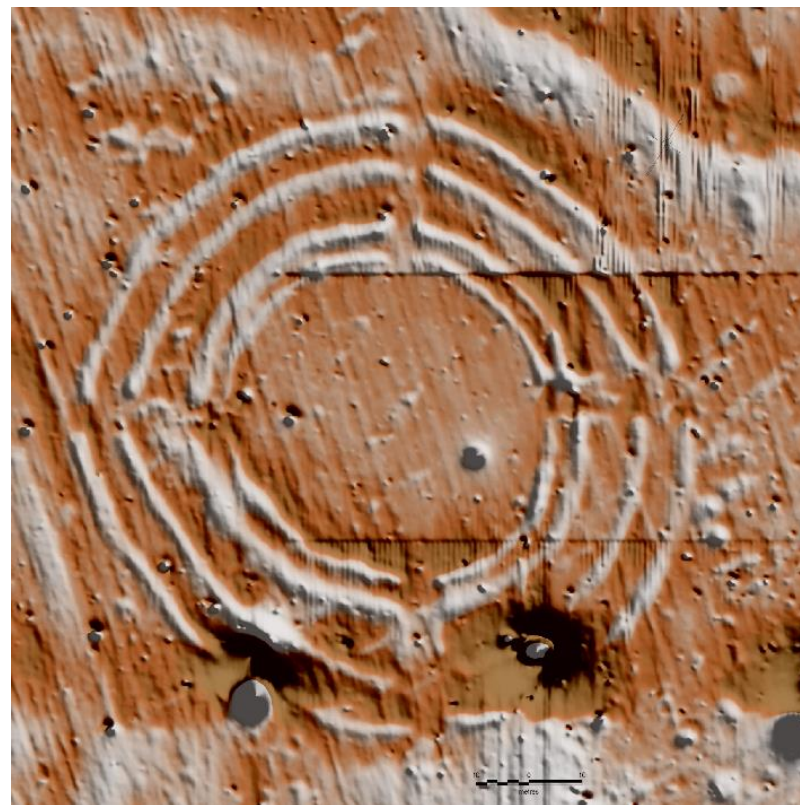
mapa magnetického poľa



BRANČ, okr. Nitra, obdobie: doba bronzová – 18. stor. p.n.l.
prevzaté od kolegov Dr. J. Tirpáka a Dr. I. Kuzmu z AÚ SAV Nitra



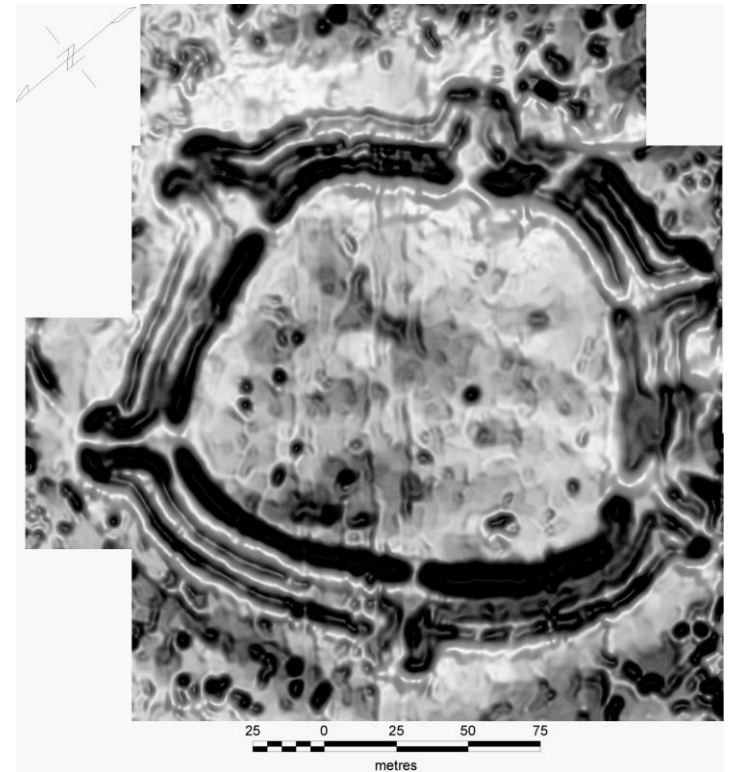
snímka z letného obdobia



mapa anomálneho magn. poľa

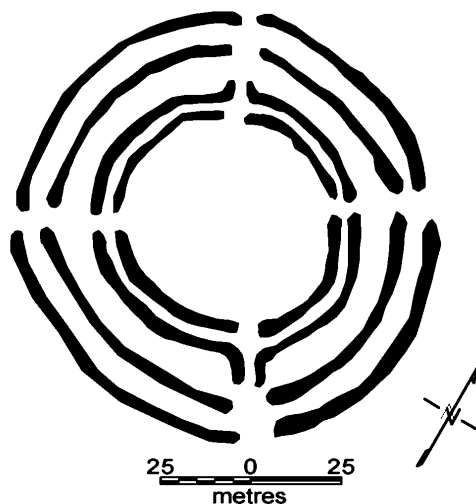
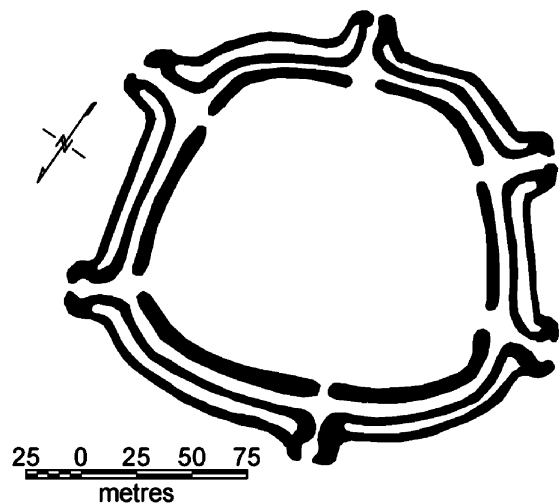
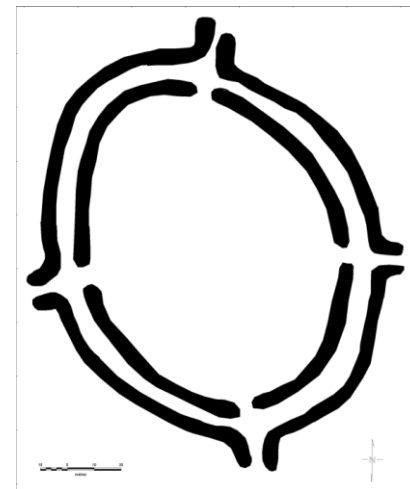
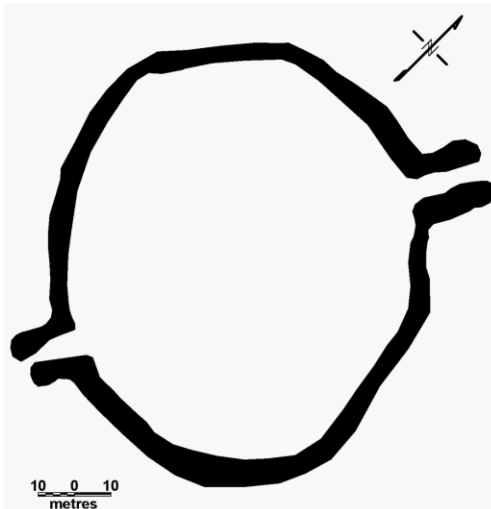
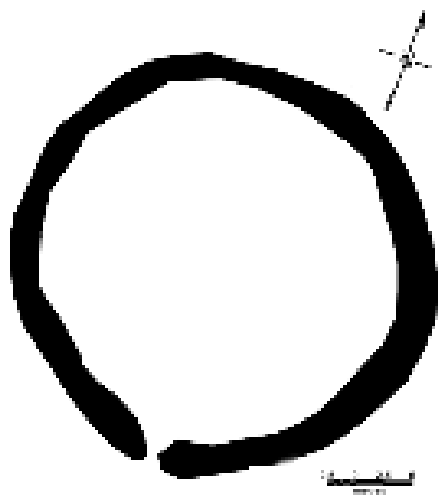
CÍFER, okr. Trnava, obdobie: neolit – 35. stor. p.n.l.

prevzaté od kolegov Dr. J. Tirpáka a Dr. I. Kuzmu z AÚ SAV Nitra



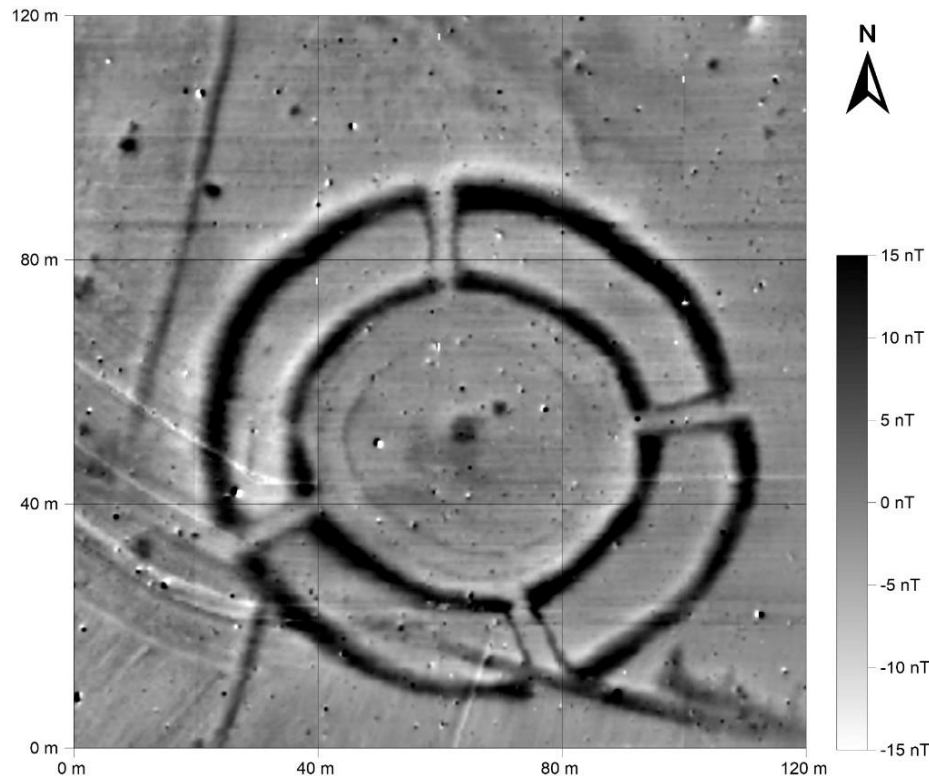
GOLIANOVO, okr. Nitra, obdobie: 35.stor. p.n.l.

prevzaté od kolegov Dr. J. Tirpáka a Dr. I. Kuzmu z AÚ SAV Nitra

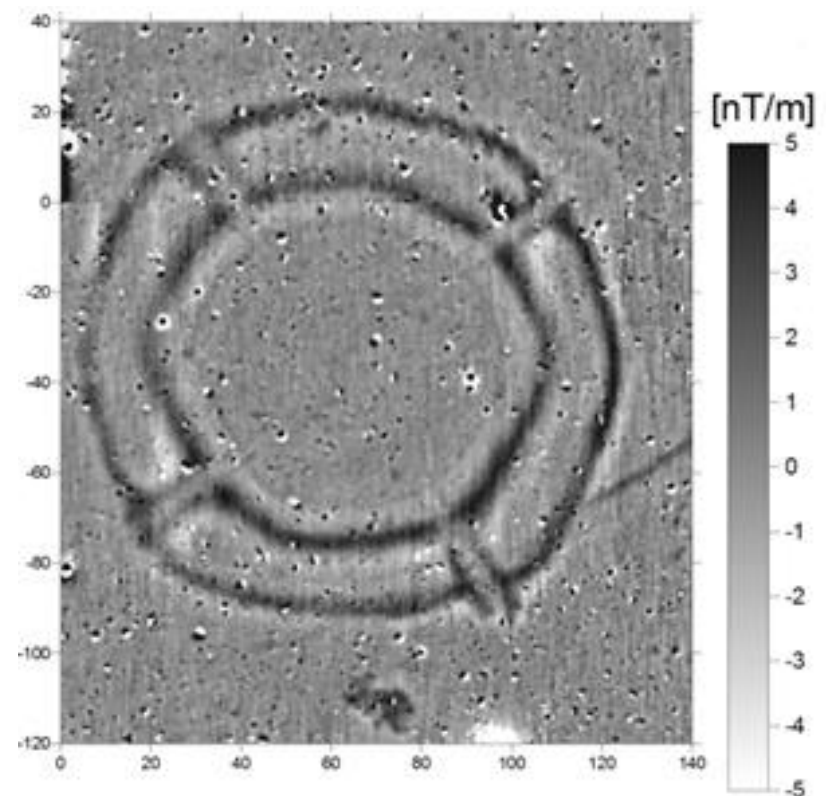


**rôzne typy detekovaných rondelových štruktúr na území západného Slovenska
(autori: Dr. I. Kuzma a Dr. J. Tirpák, Archeologický ústav SAV Nitra)**

Ďalšie príklady magnetometrickej detekcie rondelov (zo zahraničia):



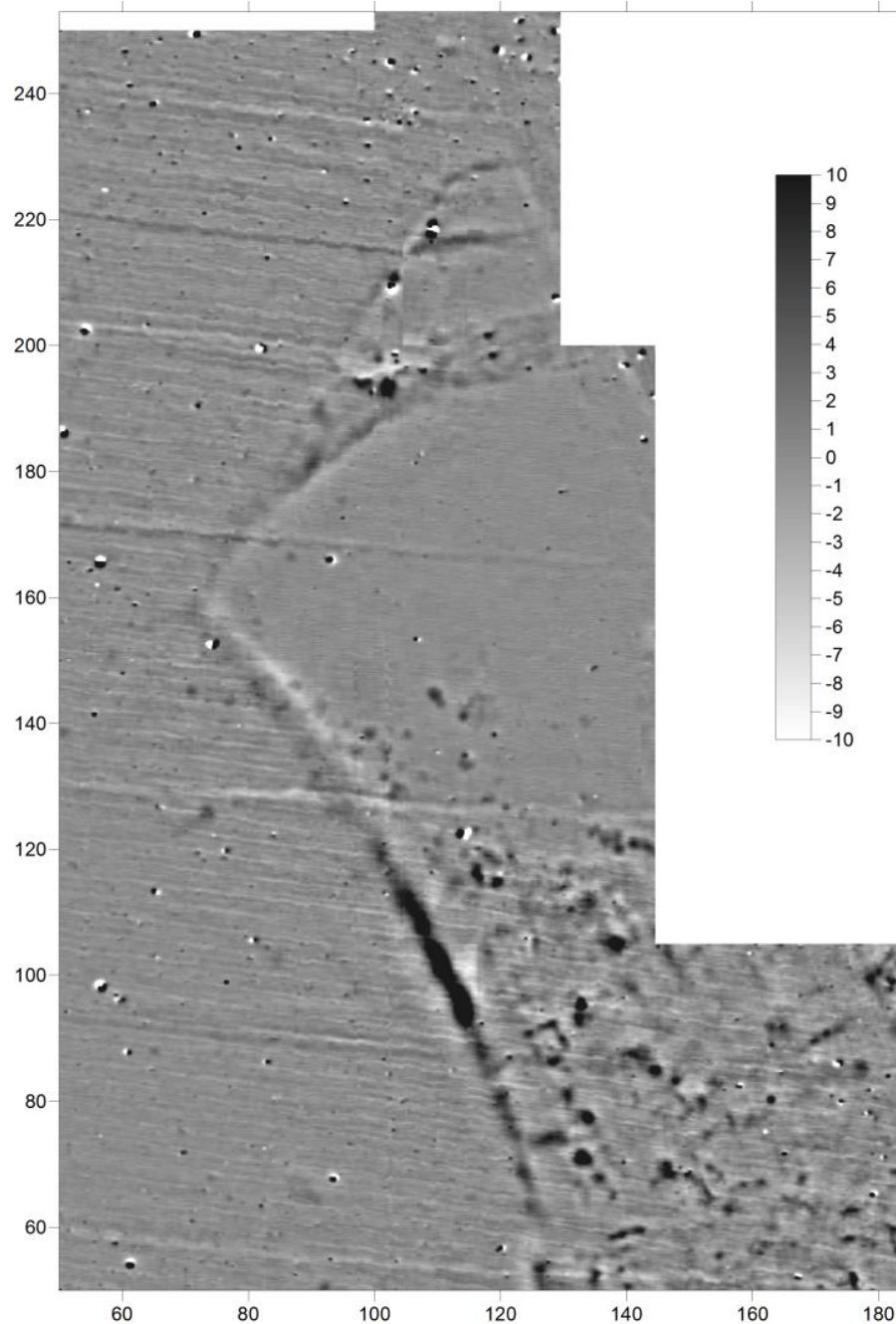
Steinabrunn, Rakúsko



Milovice, Česká Republika

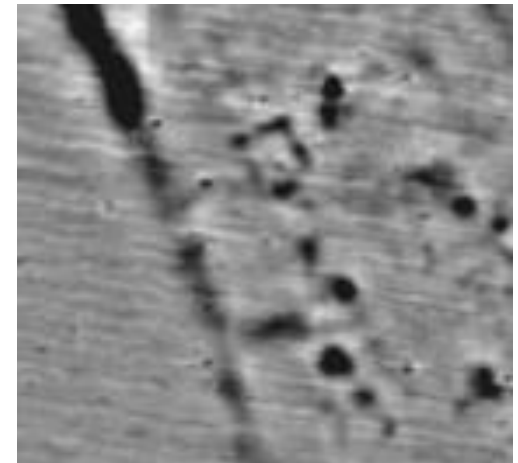
prevzaté od kolegov Dr. J. Fassbindera (Mníchov) a doc. P. Mila (Brno)

magnetometria - detekcia osídlenia



lokalita:
Hoste
(pri Majcichove),

osídlenie z doby
bronzovej



detail

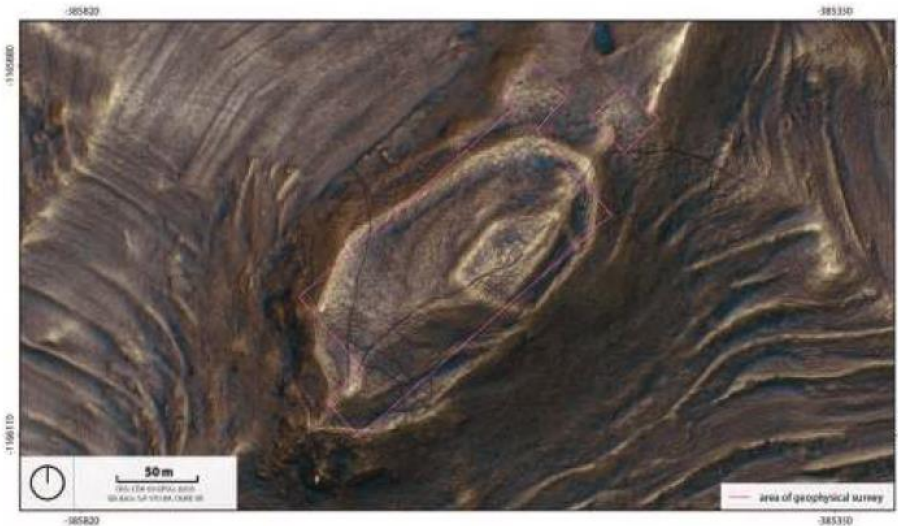
magnetometria - detekcia osídlenia

lokalita: Nižná – Ostražica (staršia a mladšia doba železná)

letecká snímka

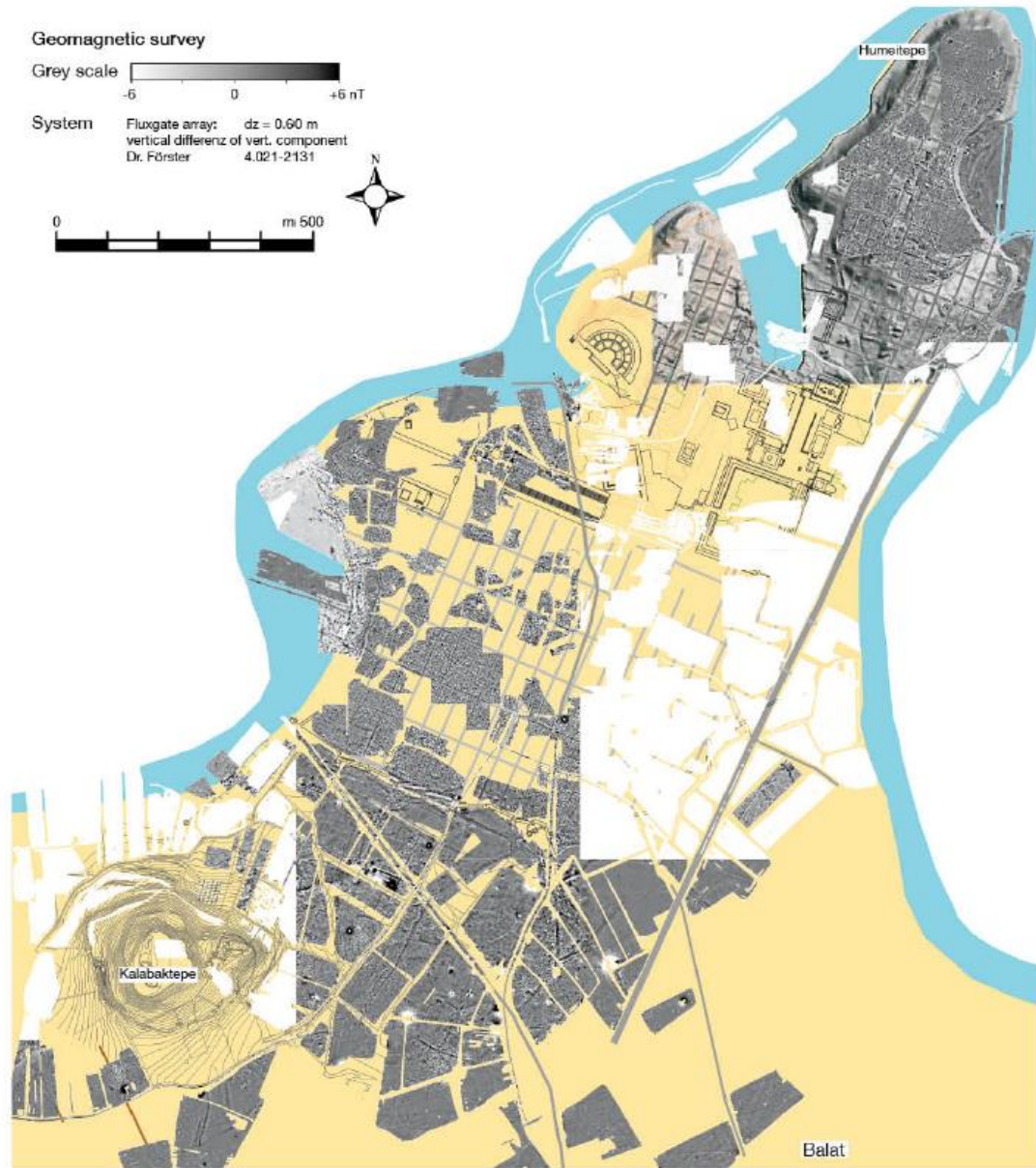


LiDAR



magnetometria

magnetometria - detekcia osídlenia



CAU-Kiel, Institute of Geosciences - Archaeo-Geophysics

prieskum veľkých plôch – príklad z Miletu (dnešné Turecko)

magnetometria - detekcia osídlenia

detail (viditeľná architektúra)

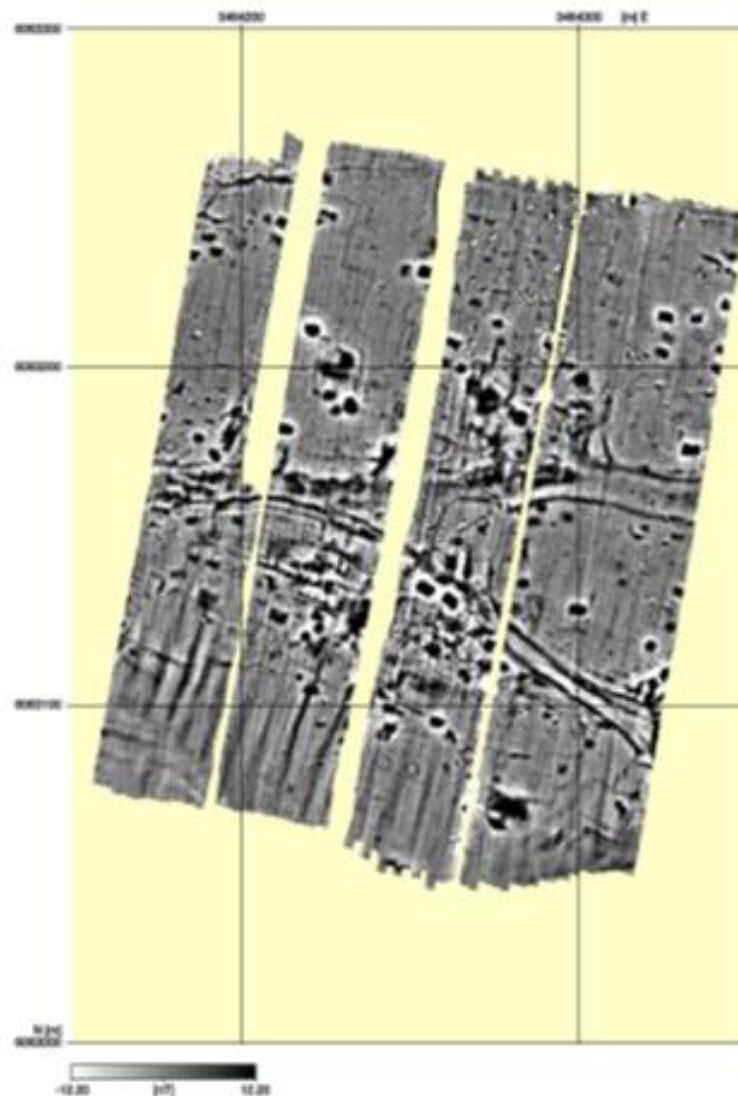


prieskum veľkých plôch – príklad z Miletu (dnešné Turecko)

letecká snímka



magnetometria



ranno-stredoveké sídlisko, ostrov Witsum (severné memecko) (priekopy, zemlianky, domy)

pithouses (zemlianky)

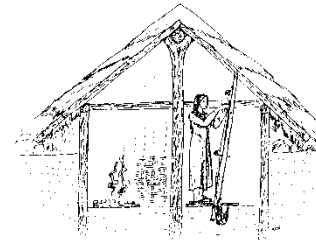
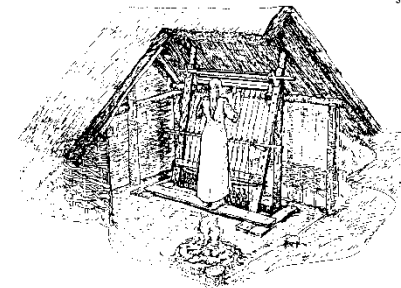
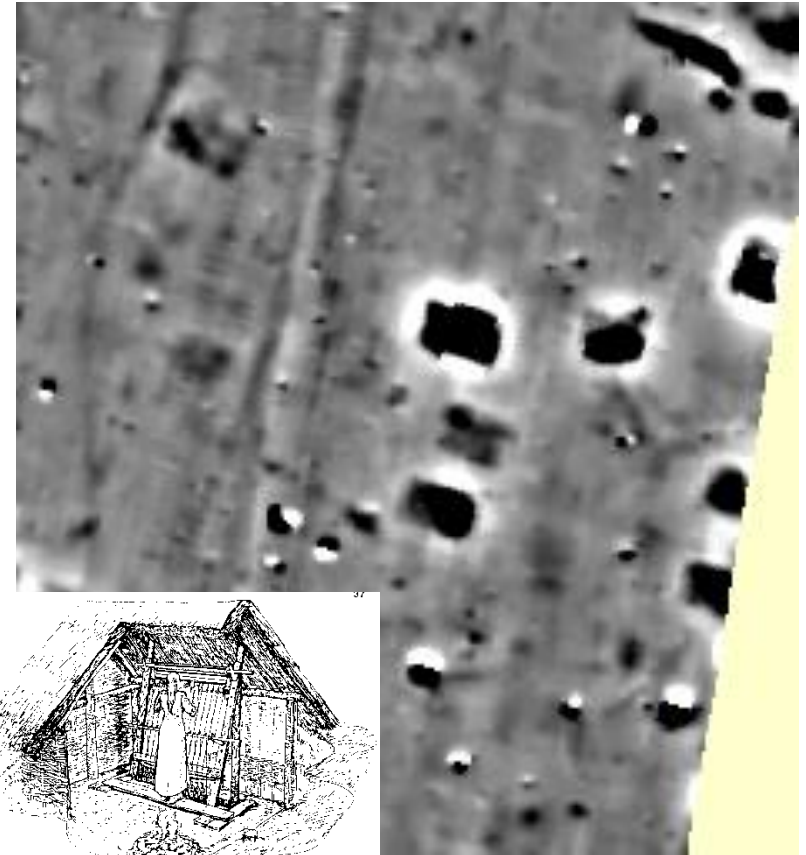
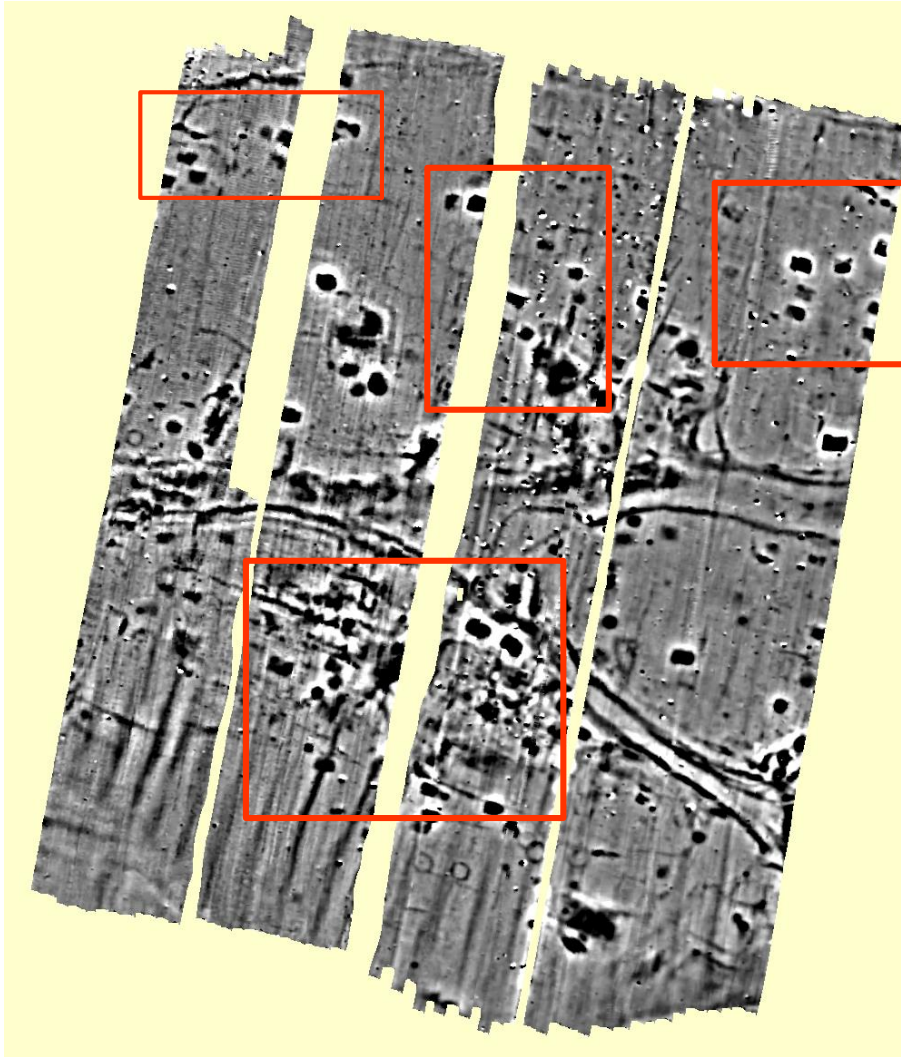
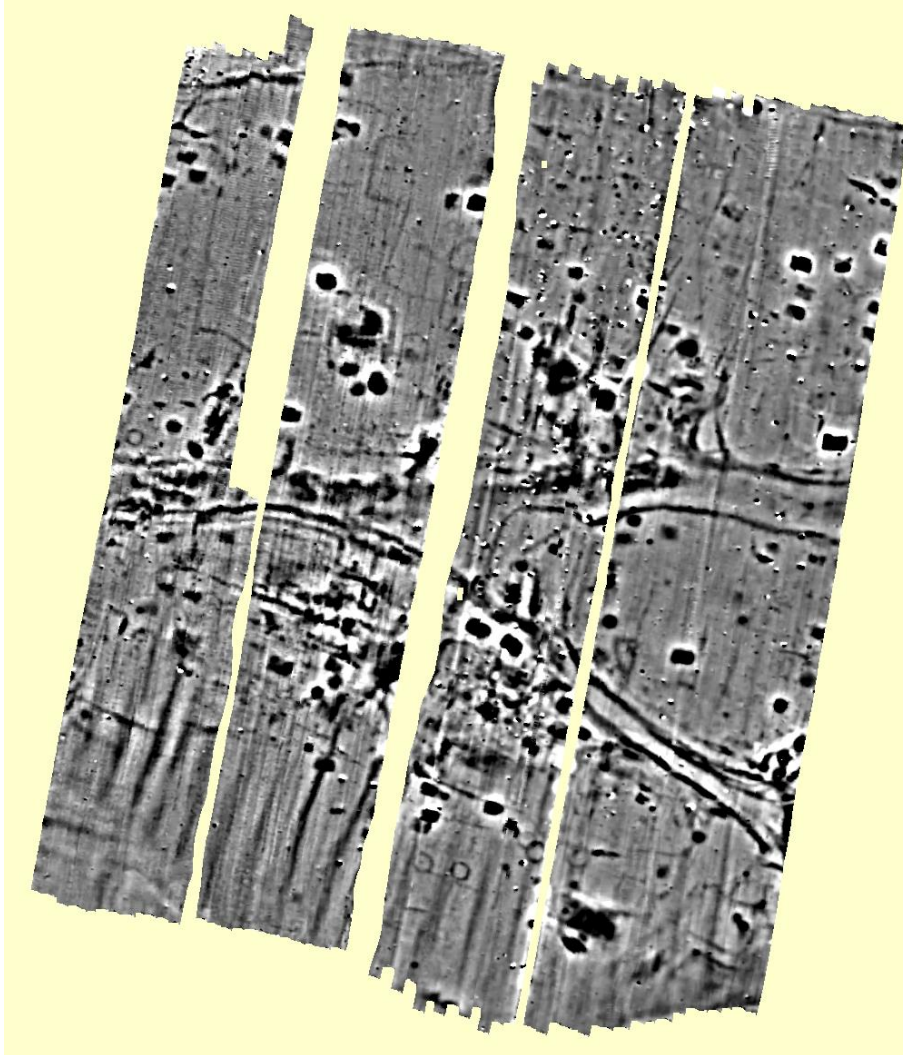
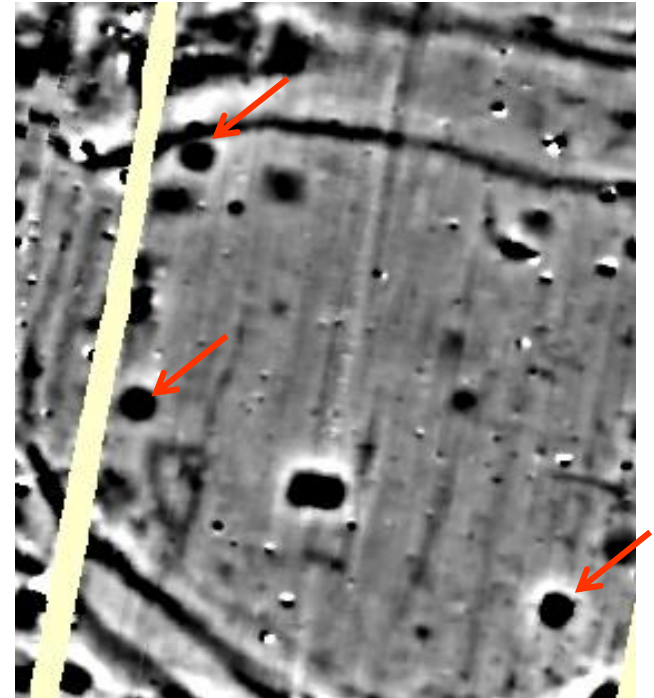


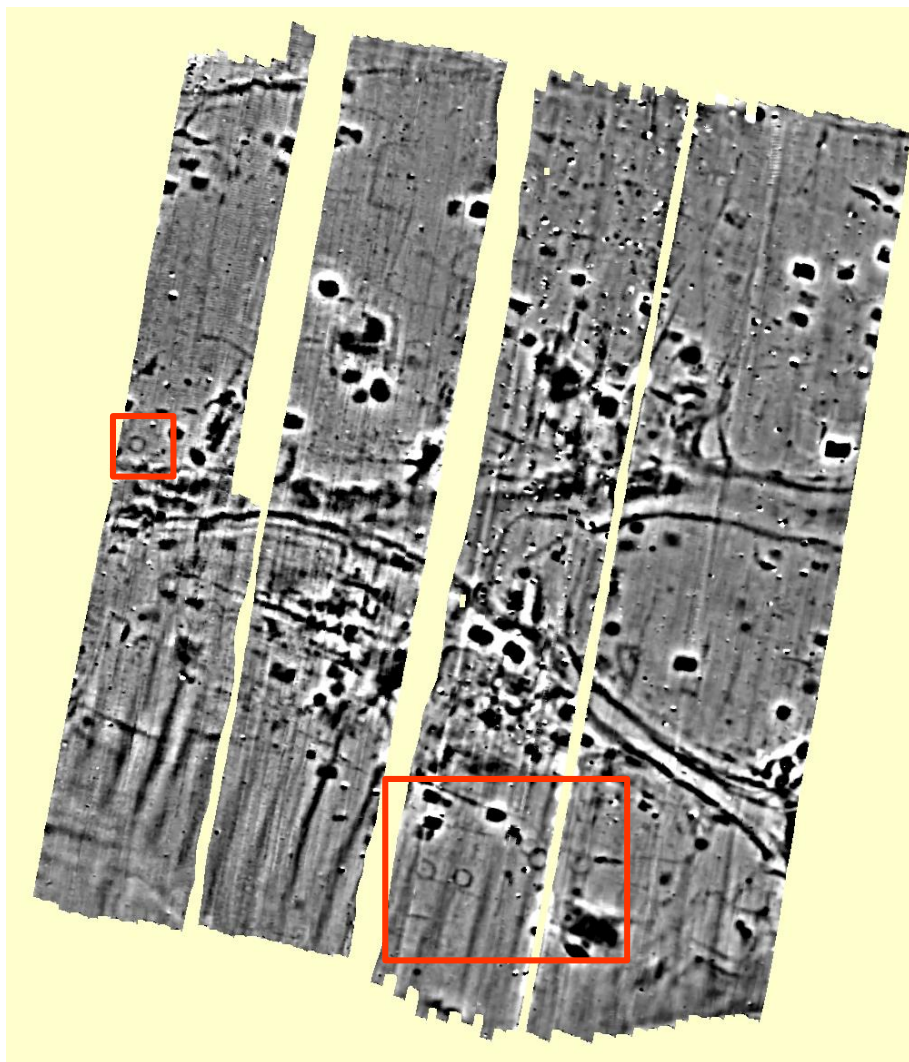
Abb. 7
Wittorf, Stadt Wittorf, Ep. 78
Rekonstruktion des Grabenbaues 2
mit Wiederaufbau des jüngsten Dattungsbaues.

ranno-stredoveké sídlisko, ostrov Witsum (severné memecko) (priekopy, zemlianky, domy)

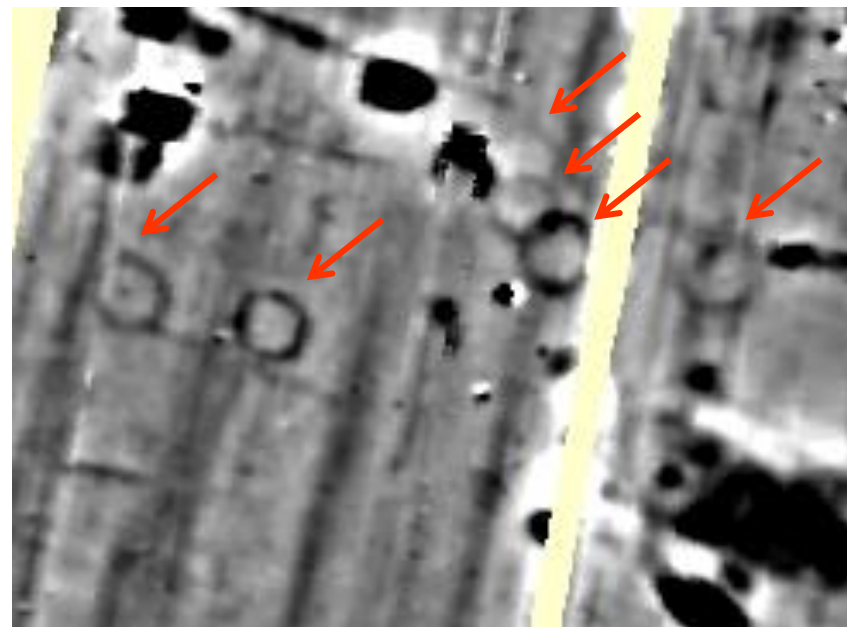


wells (studne)?





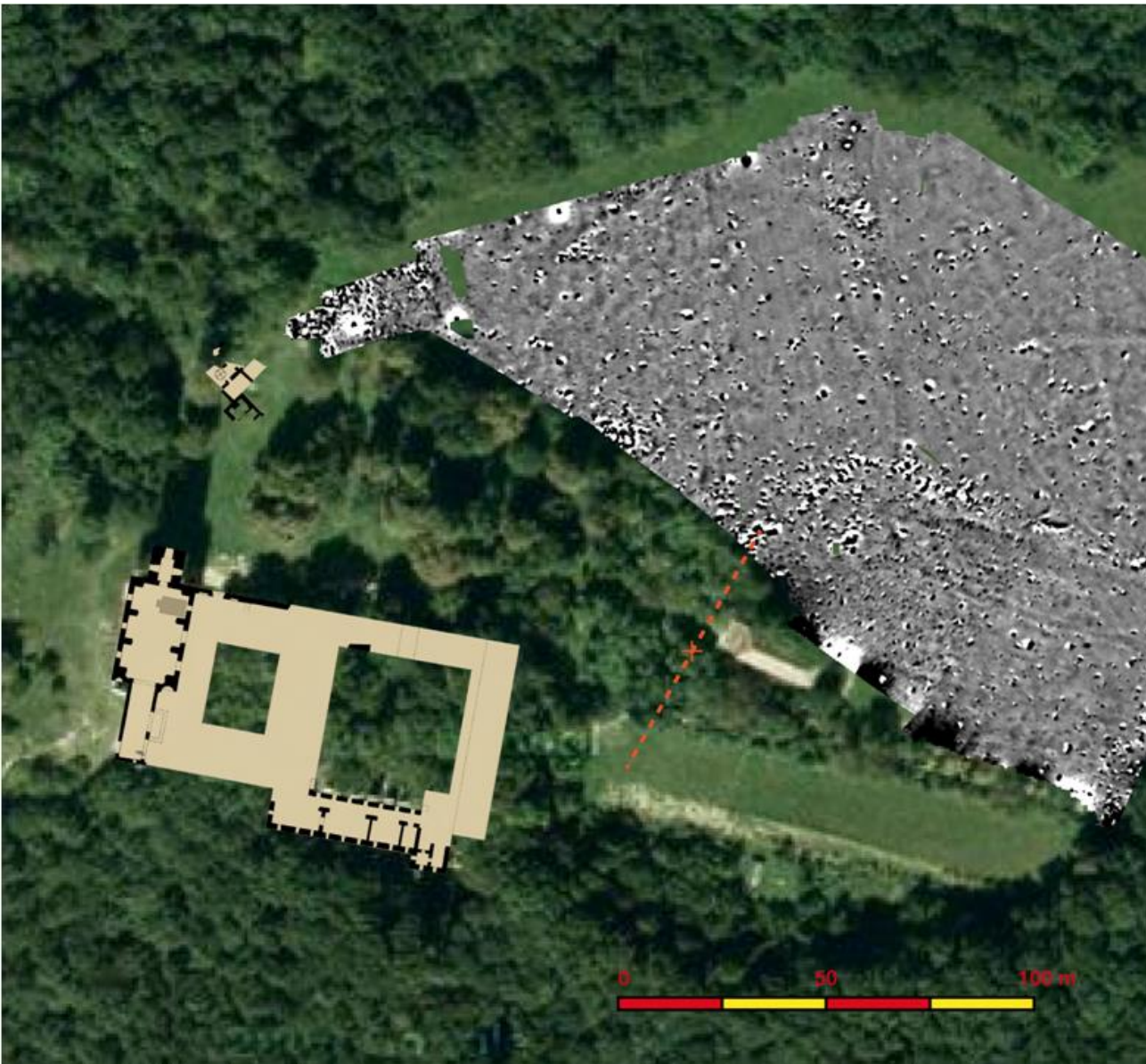
*graves, small
mounds?
(hroby, malé
mohyly?)*



Georadar

v kombinácii s inými metódami

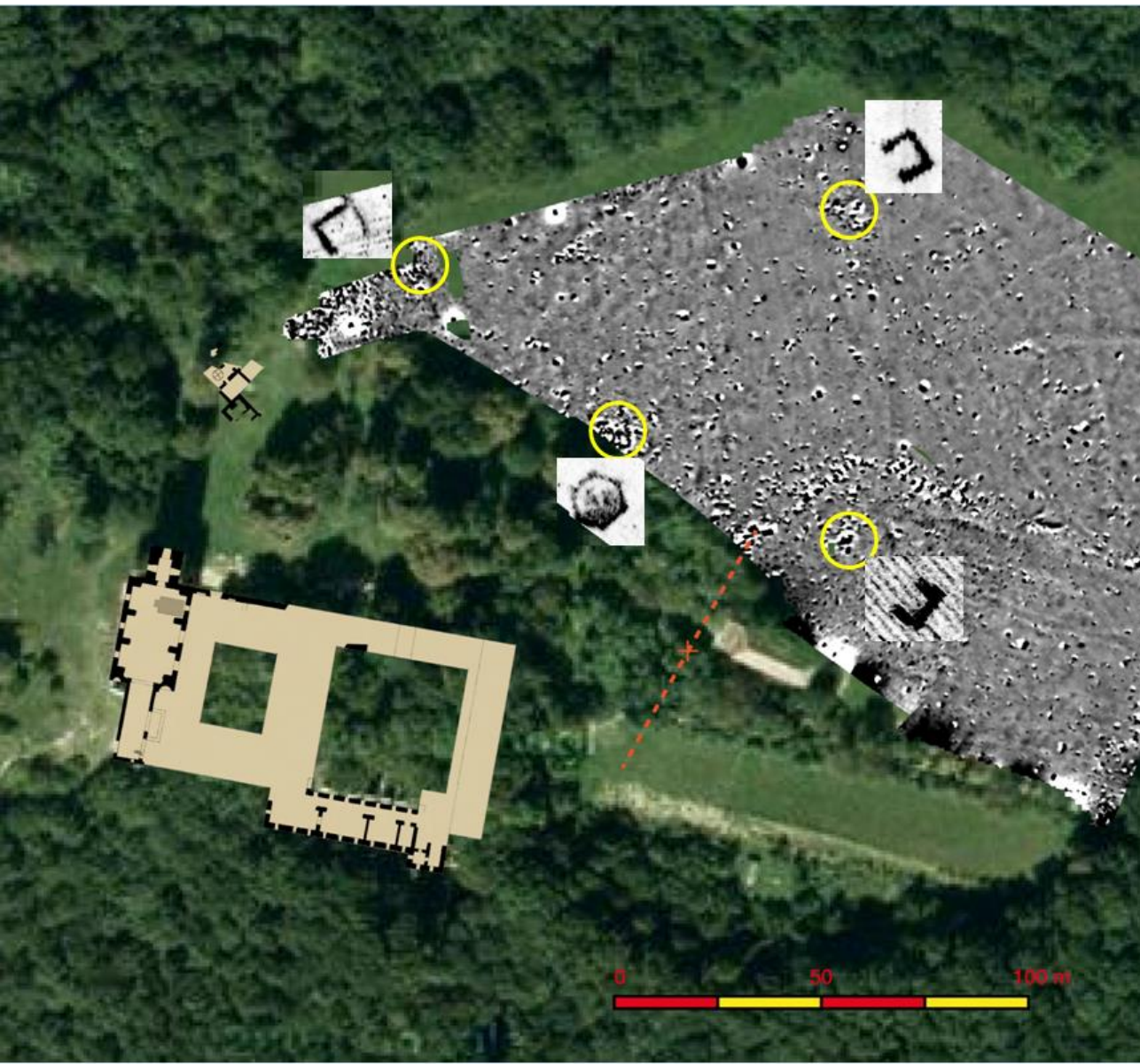
Katarínka: georadar (+iné metódy)



lokalita Katarínka:
bývalý kostol a
kláštor
Františkánov

magnetometria:
ďalšia veľká
plocha v SV
časti – viaceré
anomálne
prejavy

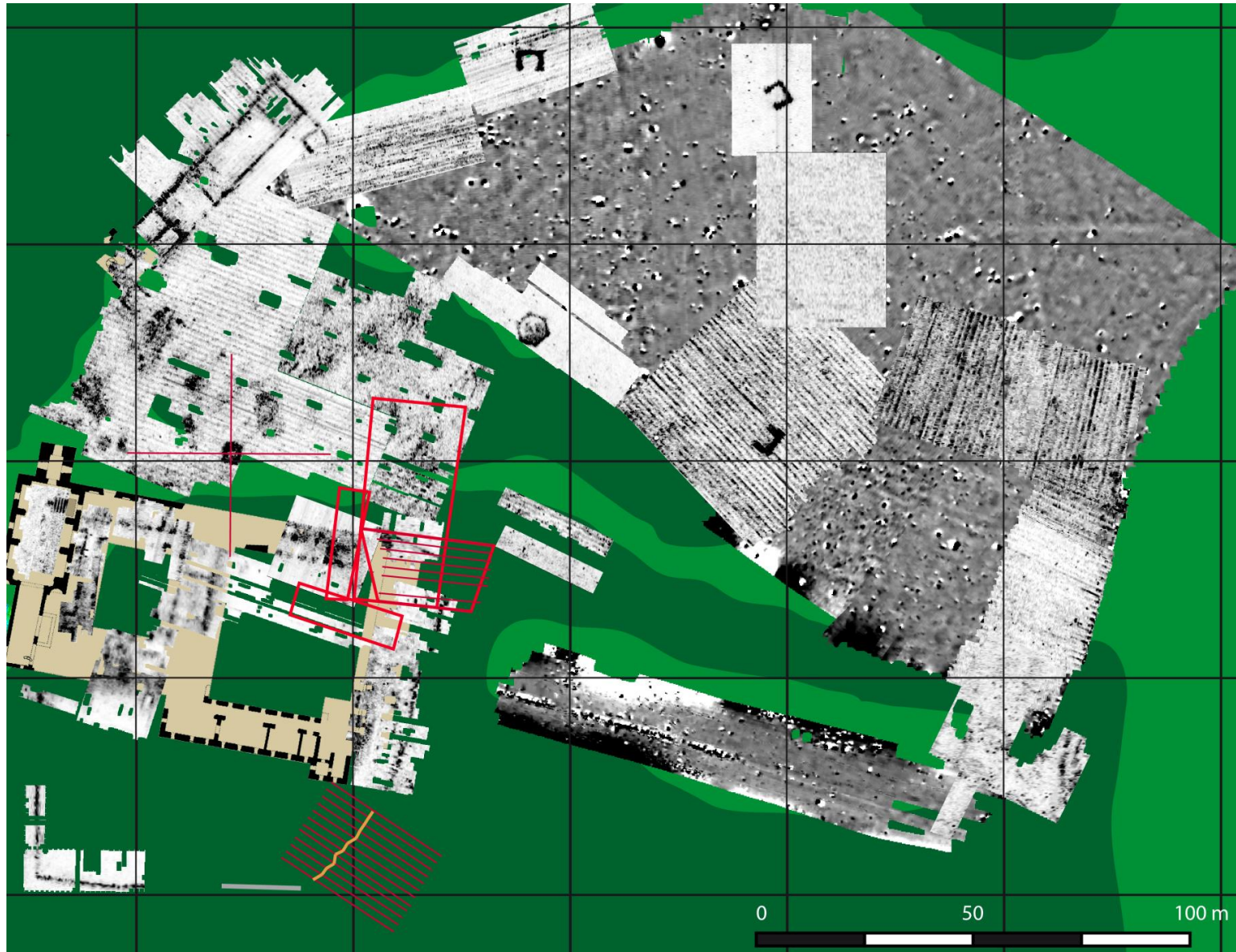
Katarínka: georadar (+iné metódy)



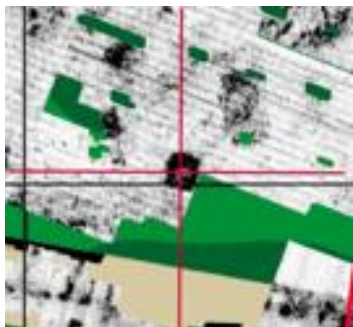
georadar:
na menších
plochách
potvrdený výskyt
ďalších zvyškov
múrov kaplniek

Katarínka: georadar (+iné metódy)

sumár geofyzikálnych výsledkov

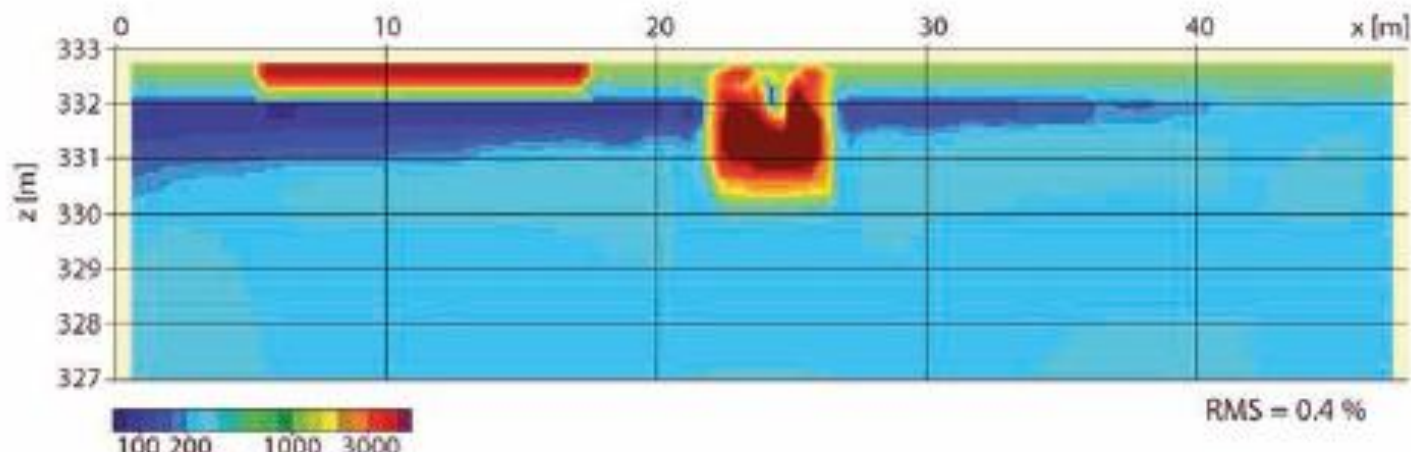


Katarínka: georadar (+iné metódy)

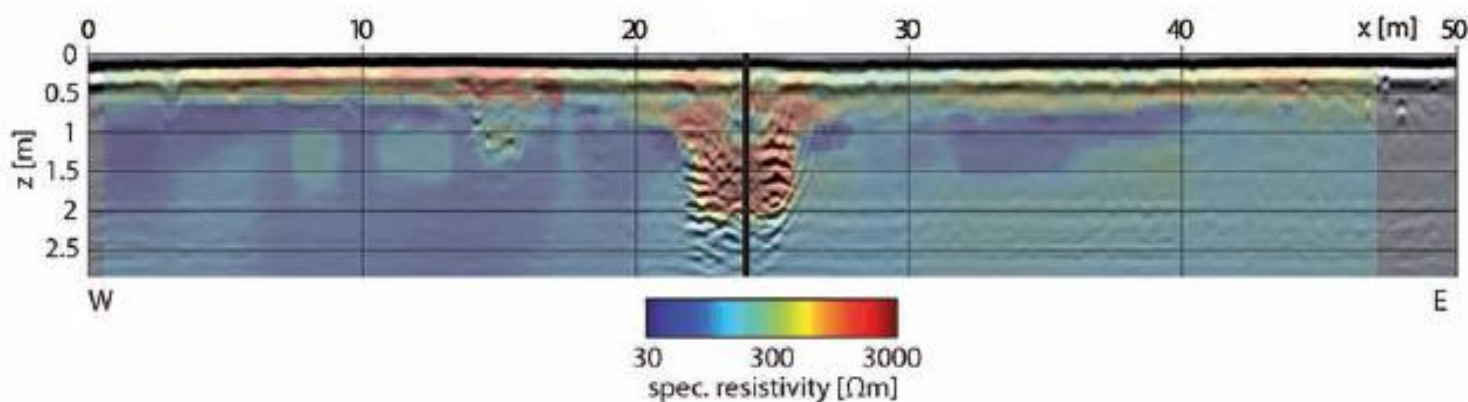


detail – historická cisterna?
kombinácia metód: ERT a GPR

ERT



GPR



Iznik: georadar (+iné metódy)



Iznik
(bývalá Nicaea)

výsledky získané počas letnej školy INCA2008 pre študentov archeológie a geofyziky (Nemecko, Turecko, Slovensko)

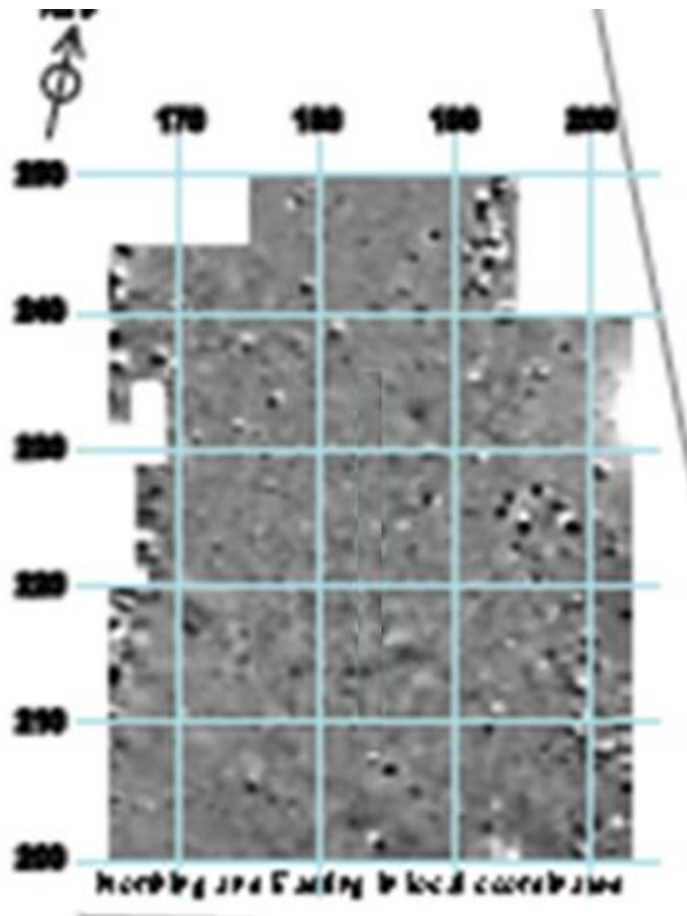
**INCA = International Course on ArcheoGeophysics
(LLP Erasmus Intensive Programme)**

Iznik: georadar (+iné metódy)

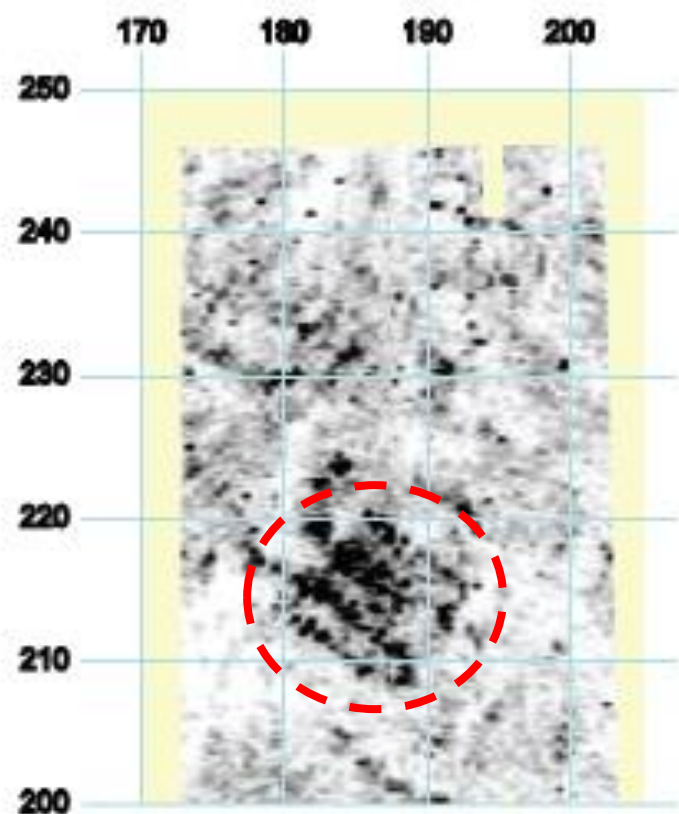


**jedna z lokalít - plocha fungovala prednedávnom
aj ako skládka odpadu**

Iznik: georadar (+iné metódy)

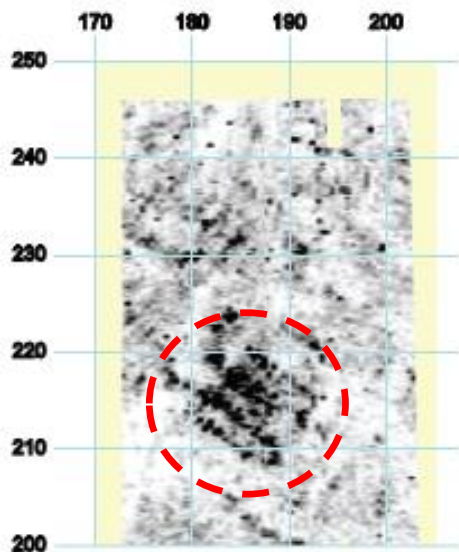


anomálne magnetické pole
(výsledné anomálne pole
bolo veľmi porušené)

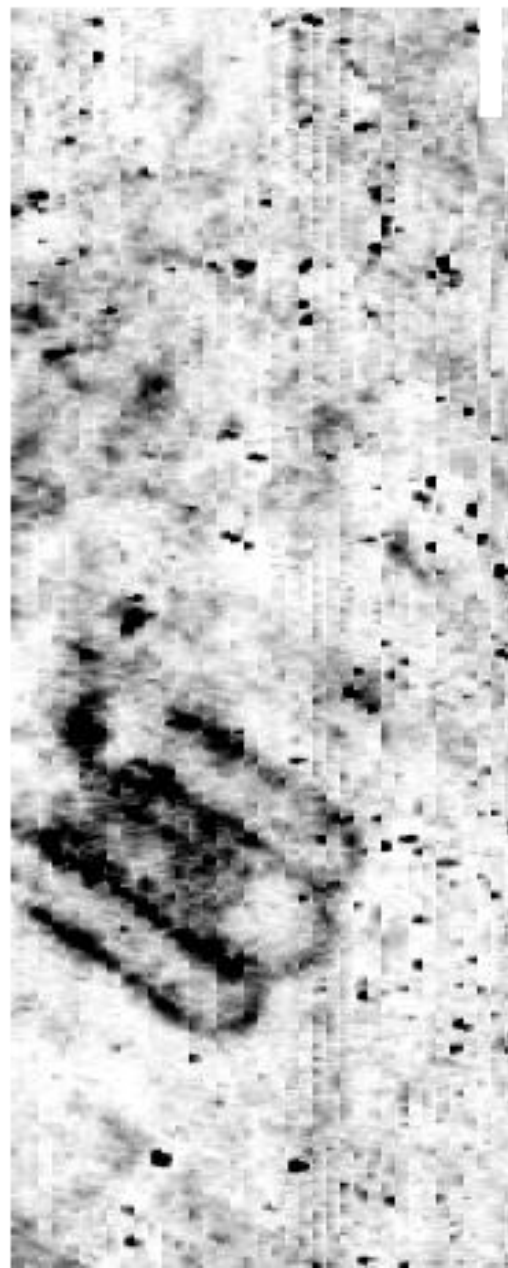


až použitie radaru (200 MHz anténa)
ukázalo prvé náznaky existencie
základov murovanej stavby

Iznik: georadar (+iné metódy)

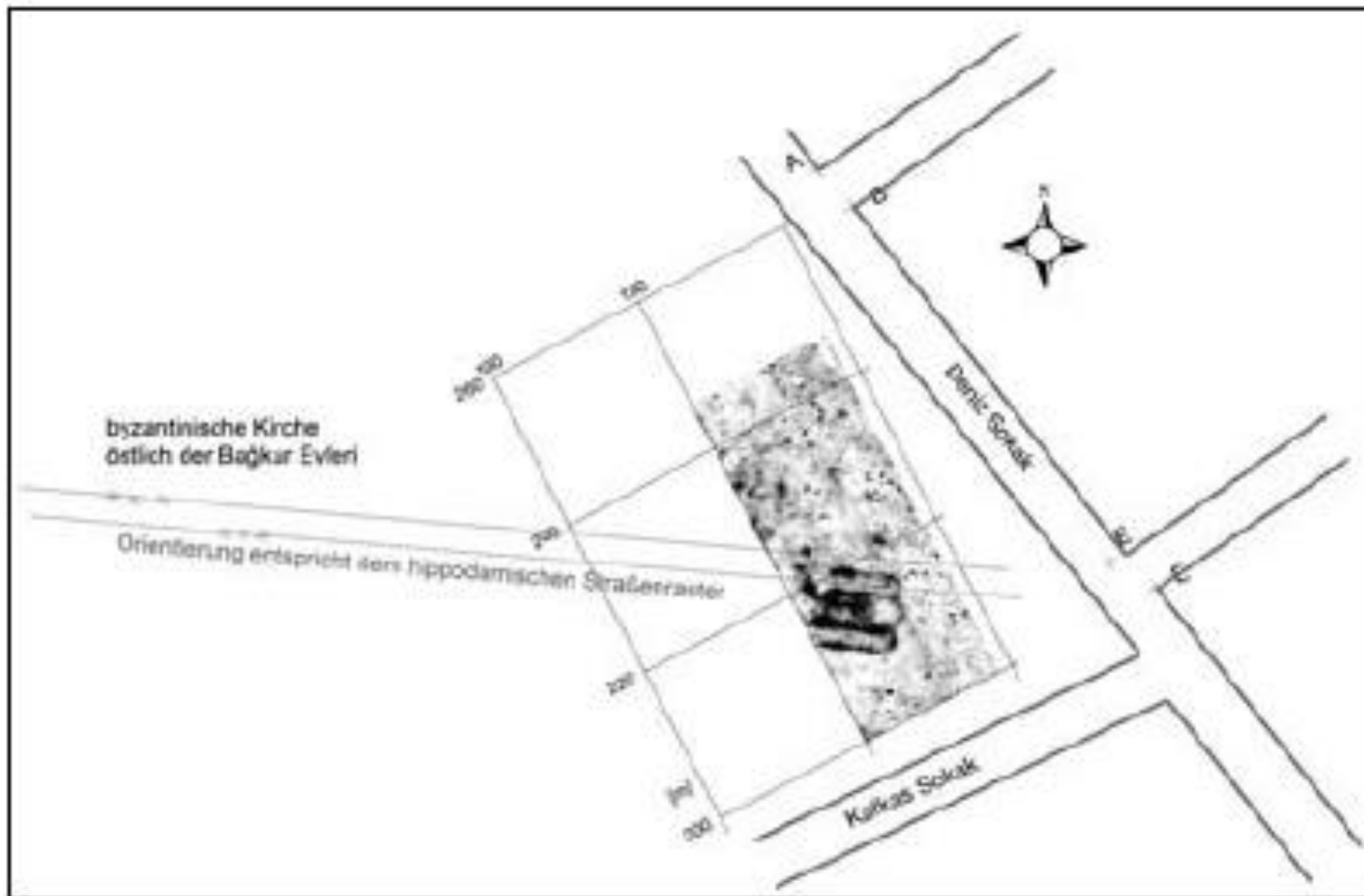


zistené náznaky existencie
základov budovy boli potvrdené
použitím 400 MHz antény



trojlod'ová
ranno-byzantská
bazilika
(je možné, že
bola súčasťou
známeho
1. Níkejského
koncilu)

Iznik: georadar (+iné metódy)

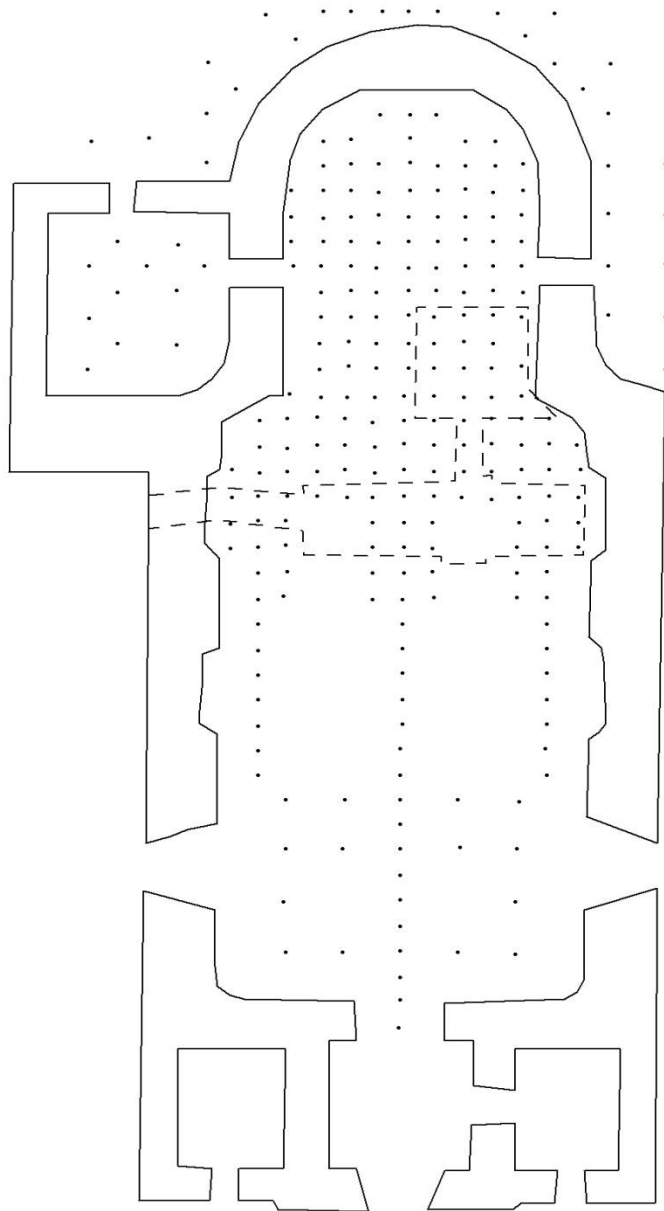


umiestnenie nálezu na súčasnú a historickú mapu ulíc

Gravimetria

v kombinácii najmä s georadarom

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



860

M. BLÍŽKOVSKÝ

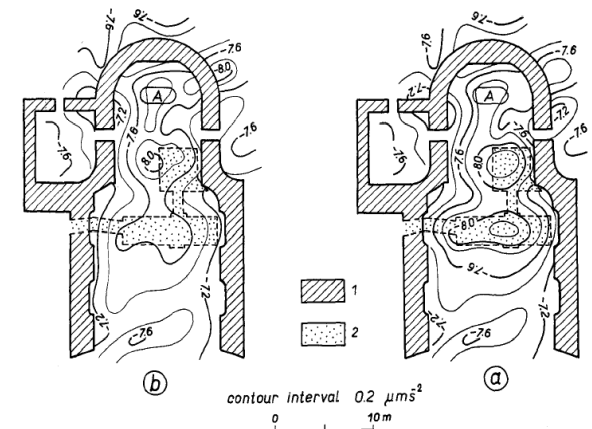
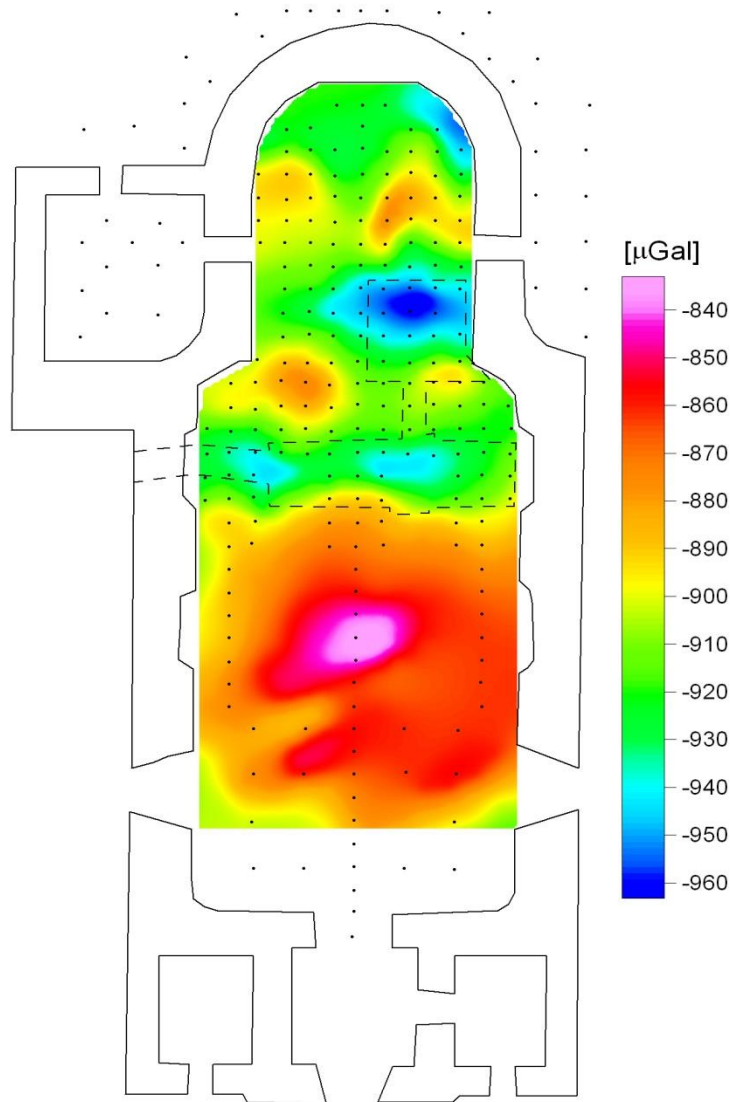


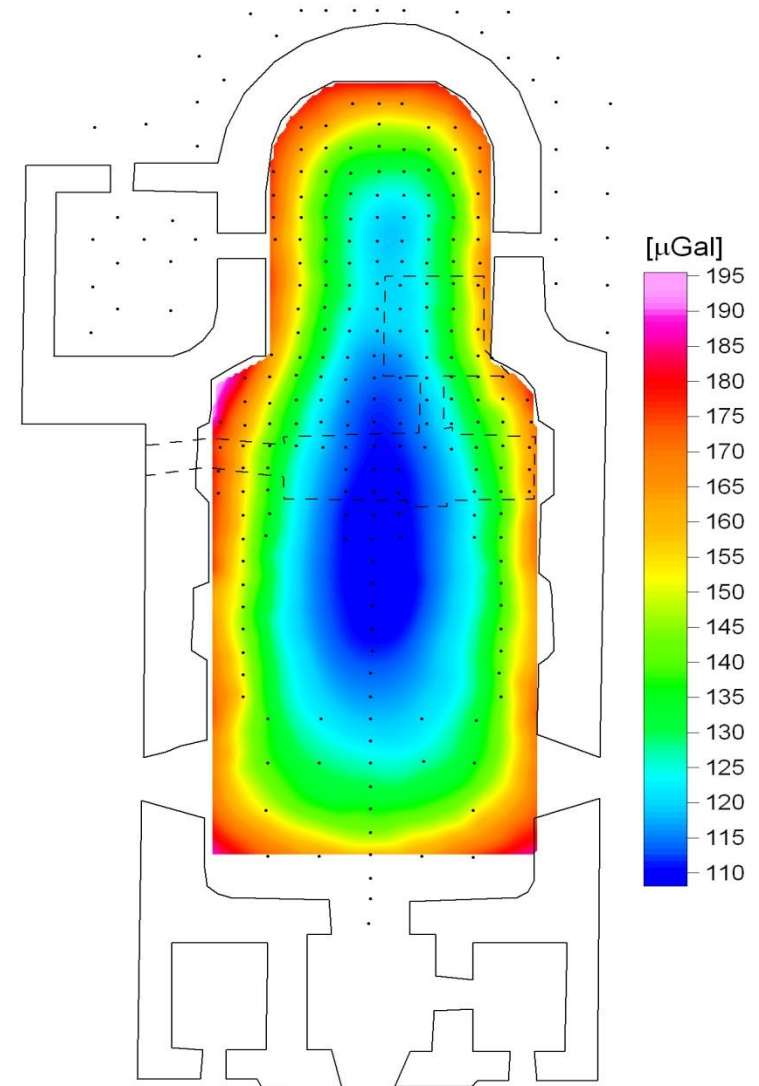
Fig. 10. Maps of Bouguer anomalies in the St. Venceslas church Tovačov. a) map corrected for gravity effect of walls, b) map corrected for gravity effects of walls and crypts.

- 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 μ Gal

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

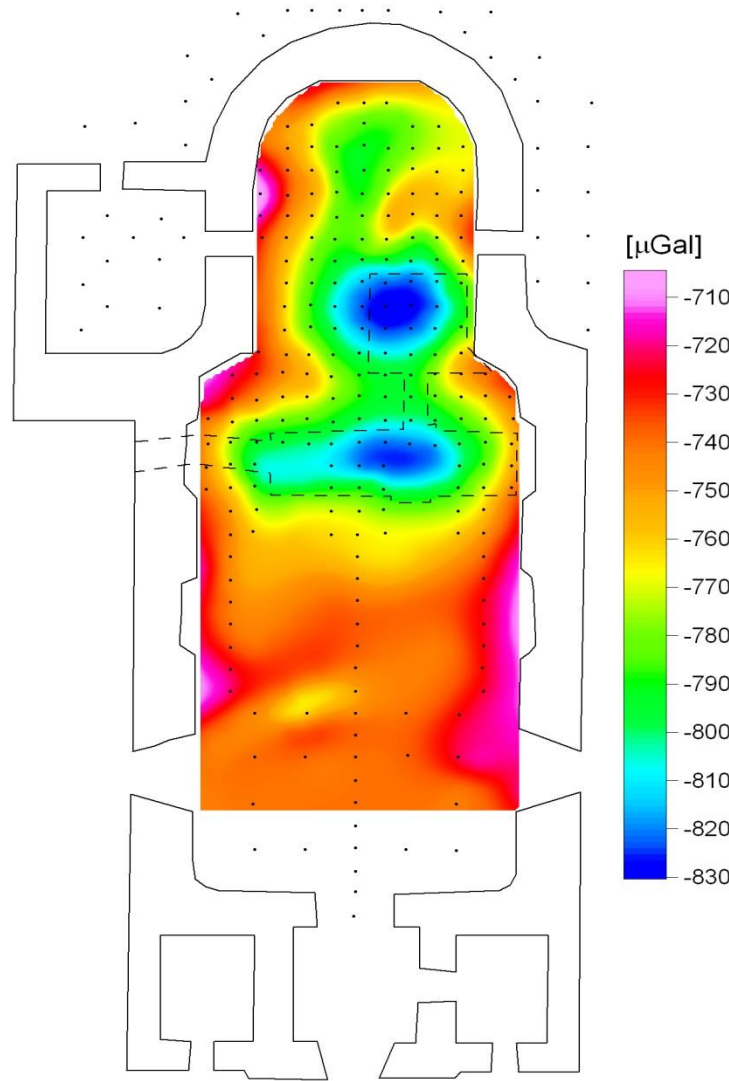


neúplné tiažové anomálie
(bez topokorekcií a opráv na účinky múrov)

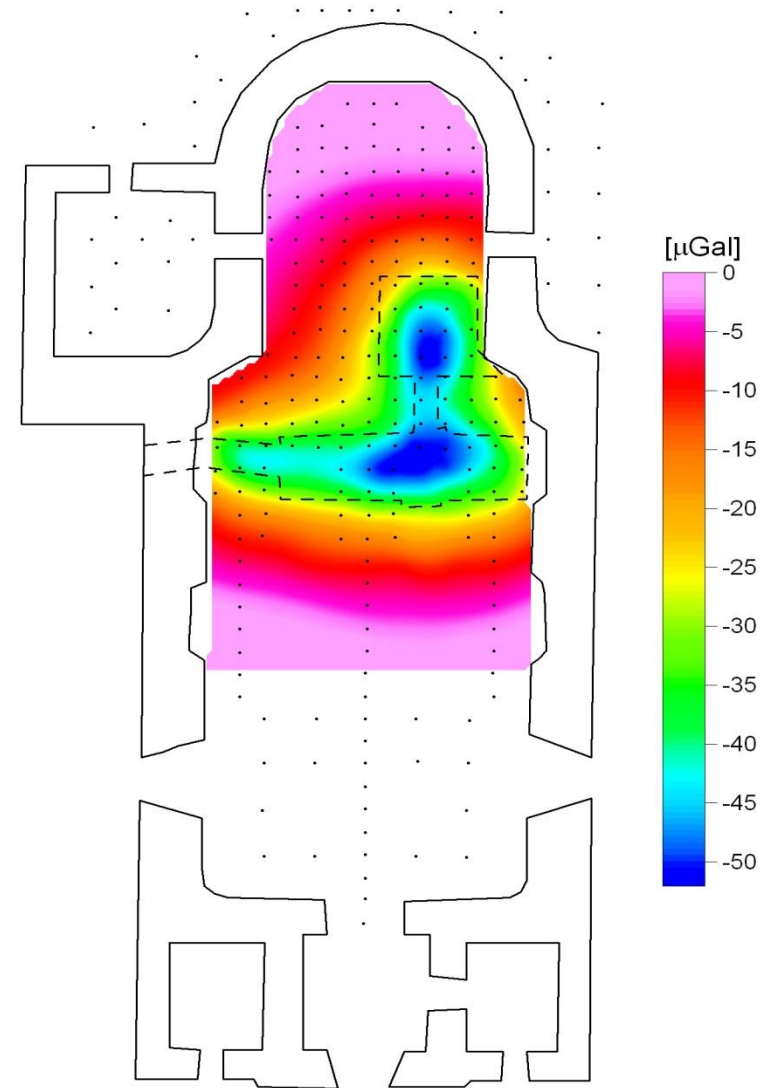


gravitačný účinok múrov

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

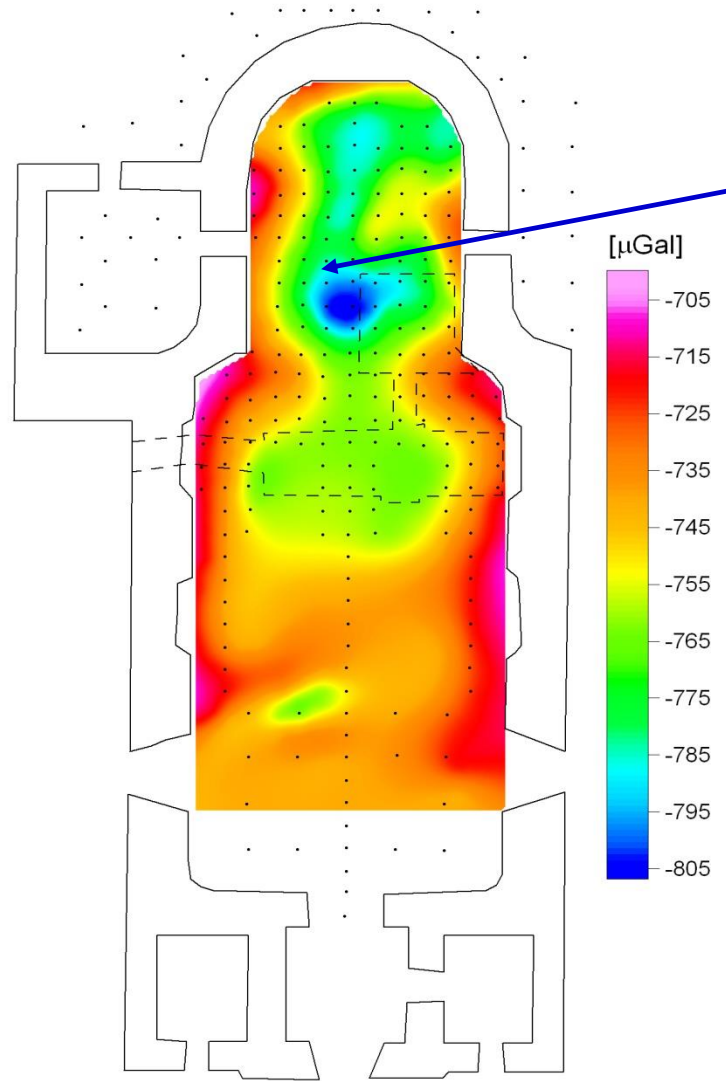


úplné tiažové anomálie
(s opravami na účinky múrov)



gravitačný účinok známych krýpt

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

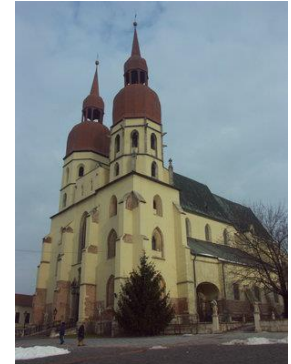


v priestore výslednej
negatívnej anomálie
boli nájdené nové,
dovtedy neznáme
priestory

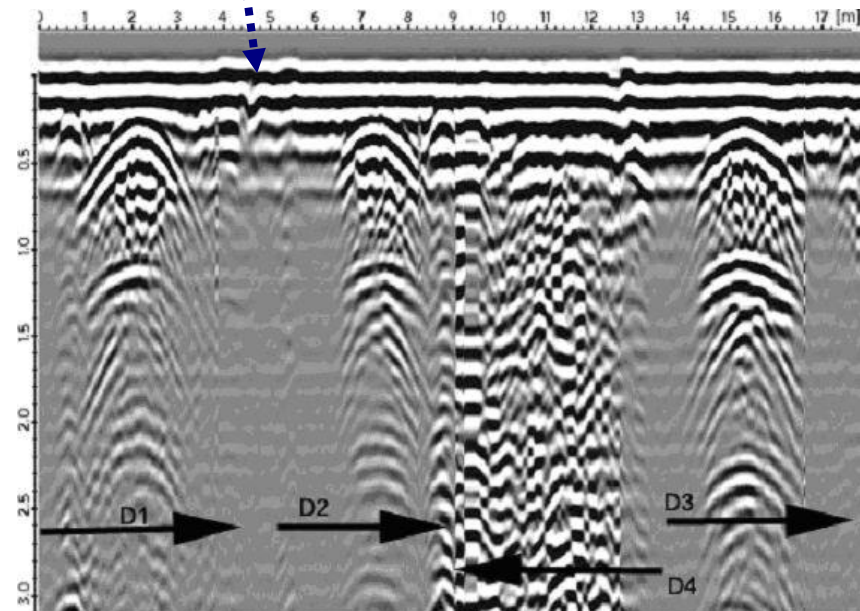
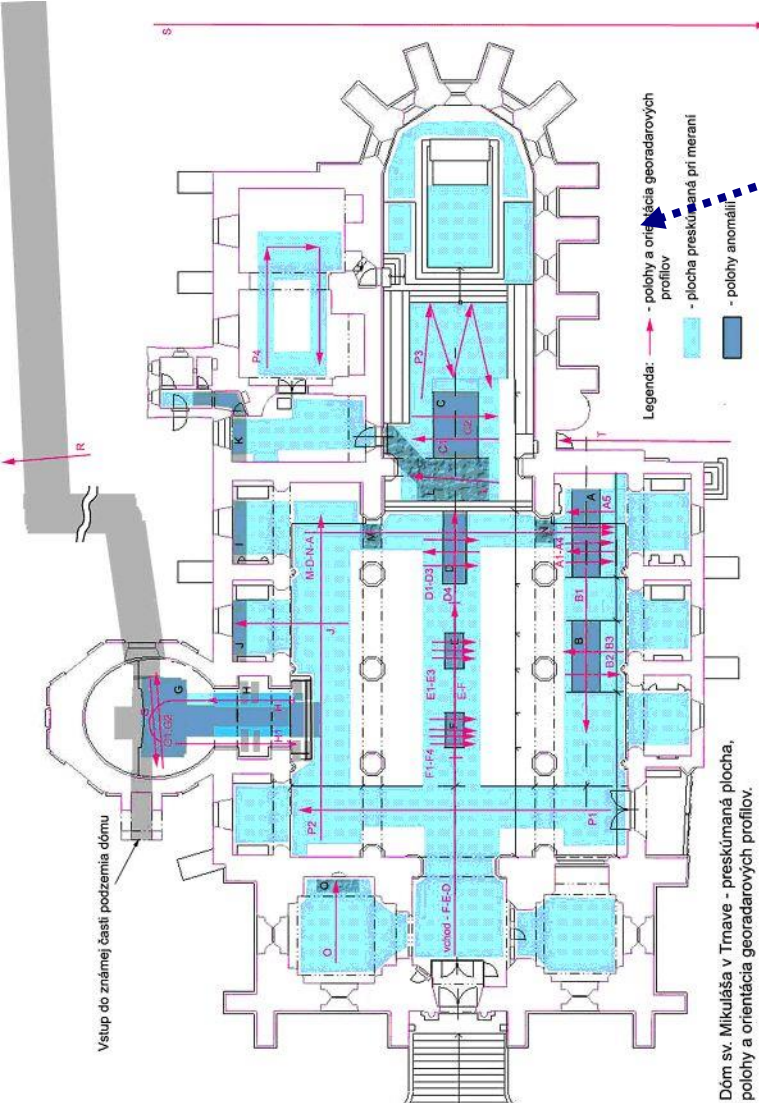
výsledok: úplné odkryté (stripped) tiažové anomálie
(s odstránením účinkov známych dutín)

Georadar a gravimetria

výsledky prieskumu dómu sv. Mikuláša v Trnave



plošné a profilové
(radargramy) zobrazenie
výsledkov georadaru

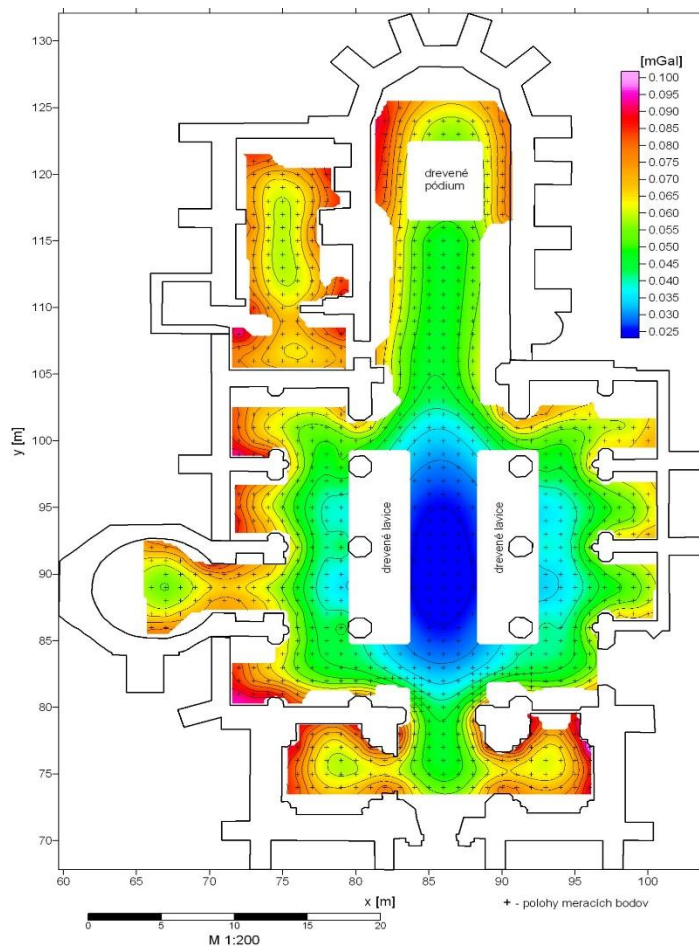


Georadar a gravimetria

výsledky prieskumu dómu sv. Mikuláša v Trnave

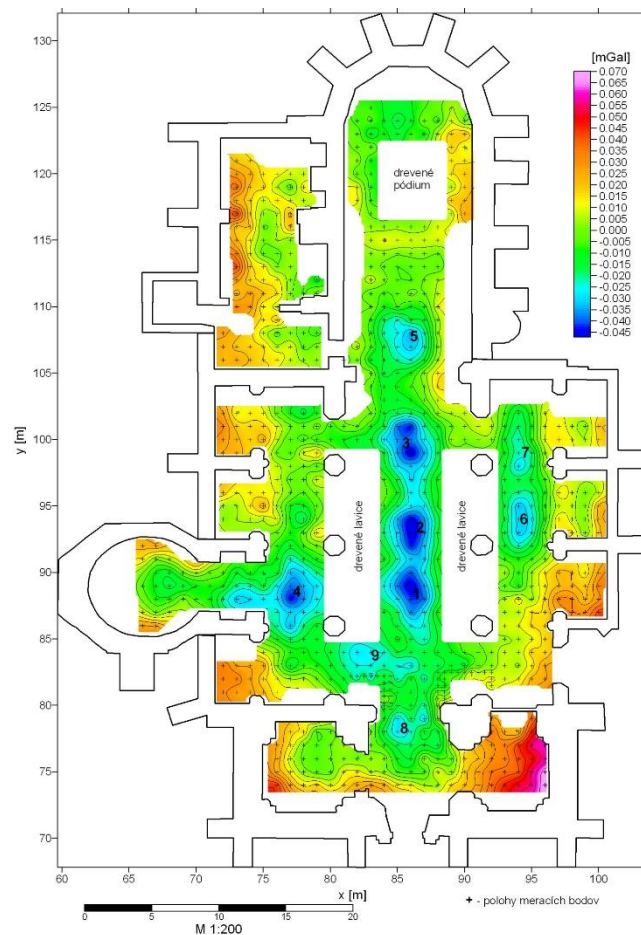


gravitačný účinok múrov



Obr. 6 Mapa priebihu gravitačných účinkov múrov v priestore kostola

úplné tiažové anomálie



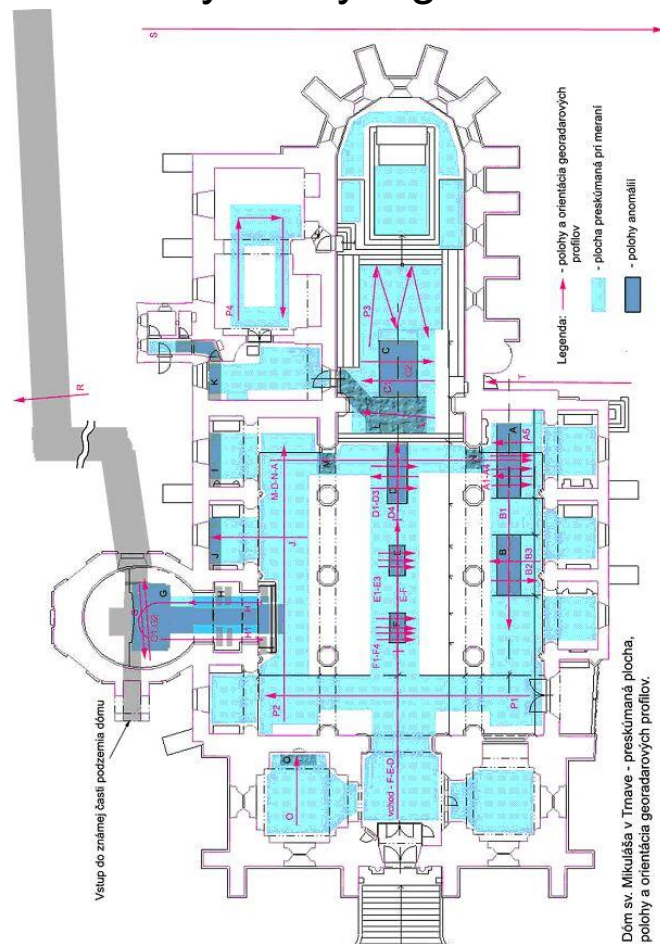
Obr. 8 Mapa priebihu lokálnych neúplných Bouguerových anomálií v priestore kostola (so zavedením opráv o gravitačný účinok múrov a odstráneným trendom), kor. hustota = 1.80 g cm^{-3}

Georadar a gravimetria

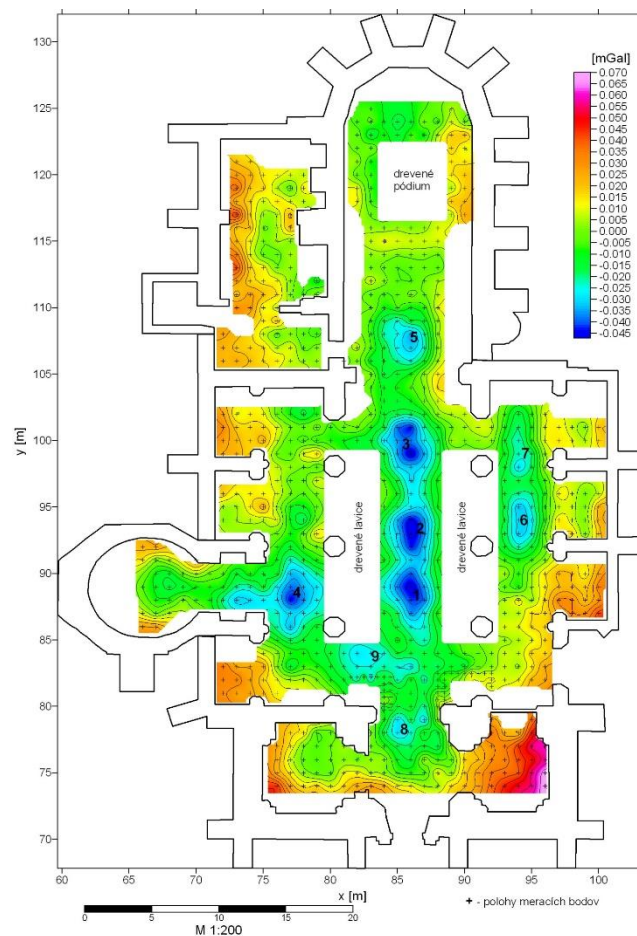
výsledky prieskumu dómu sv. Mikuláša v Trnave



výsledky z georadaru



úplné tiažové anomálie



všetky zistené anomálie boli následne overené videoinšpekciou
– navrtaním a zasunutím priemyselnej minikamery s osvetlením



1. vrtanie po odkrytí dlažby



2. paženie



3. vsunutie kamery do otvoru



4. obhliadka priestoru



5. nahratie videosekvencie



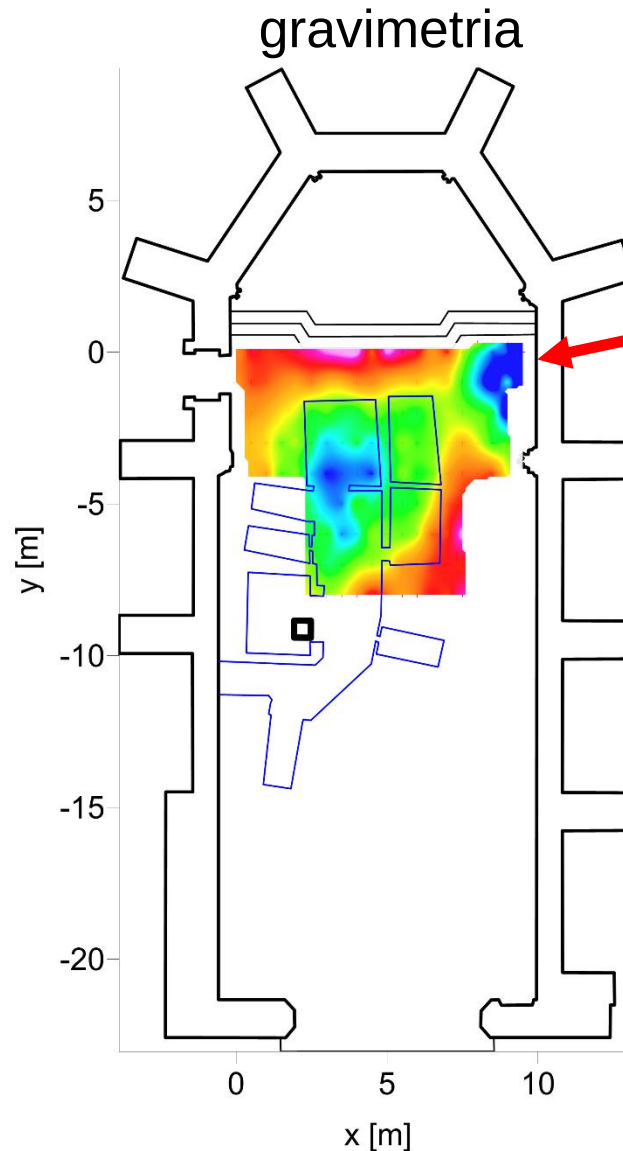
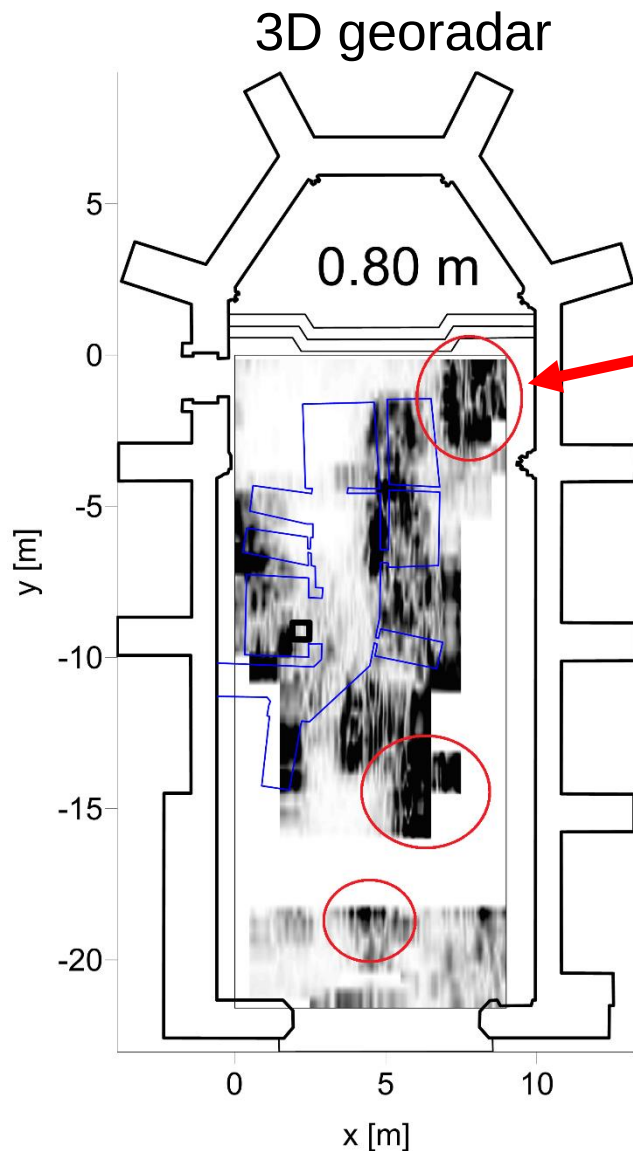
6. opätovné uloženie dlažby

výsledky prieskumu dómu sv. Mikuláša v Trnave -
- výsledky videoinšpekcie

*fotografie zo záberov vnútra
niektorých objavených krýpt*



výsledky prieskumu apsidy dómu sv. Martina v Bratislave



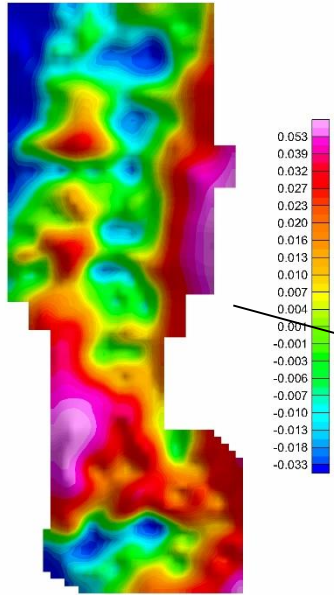
zatiaľ
neznámy
dutý
priestor

pôdorys modrou farbou – známe krypty

realized microgravimetical explorations for crypts in churches (Slovakia)

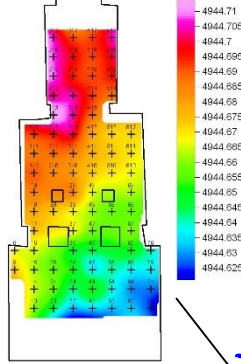
1998,

4 crypts detected,
1 found



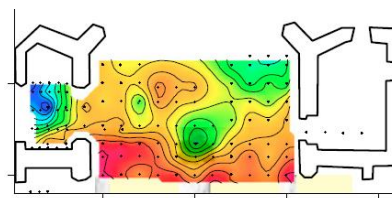
2001,

no crypts found



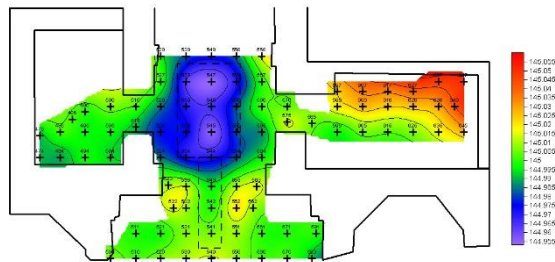
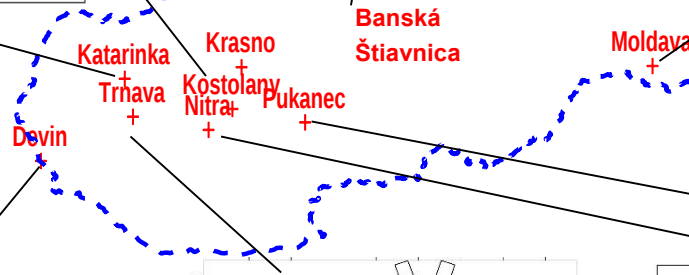
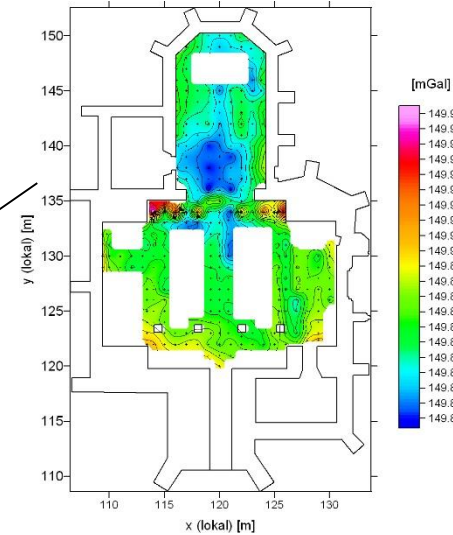
2016,

2 crypts detected (should be verified)



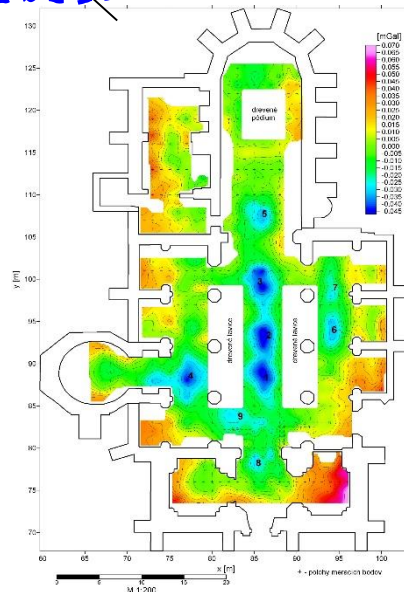
2006, pitfall!

(filled sink instead of a crypt)

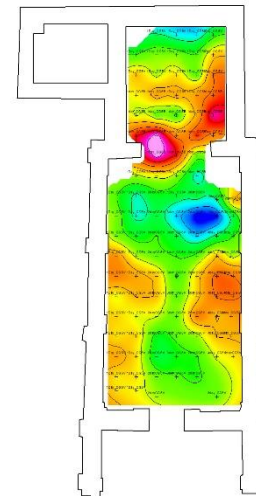


2002,

test site – known
crypt detected

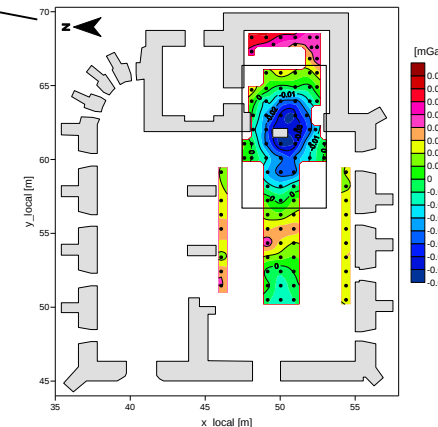


2006, 8 crypts found



2009,

2 crypts detected
(should be verified)



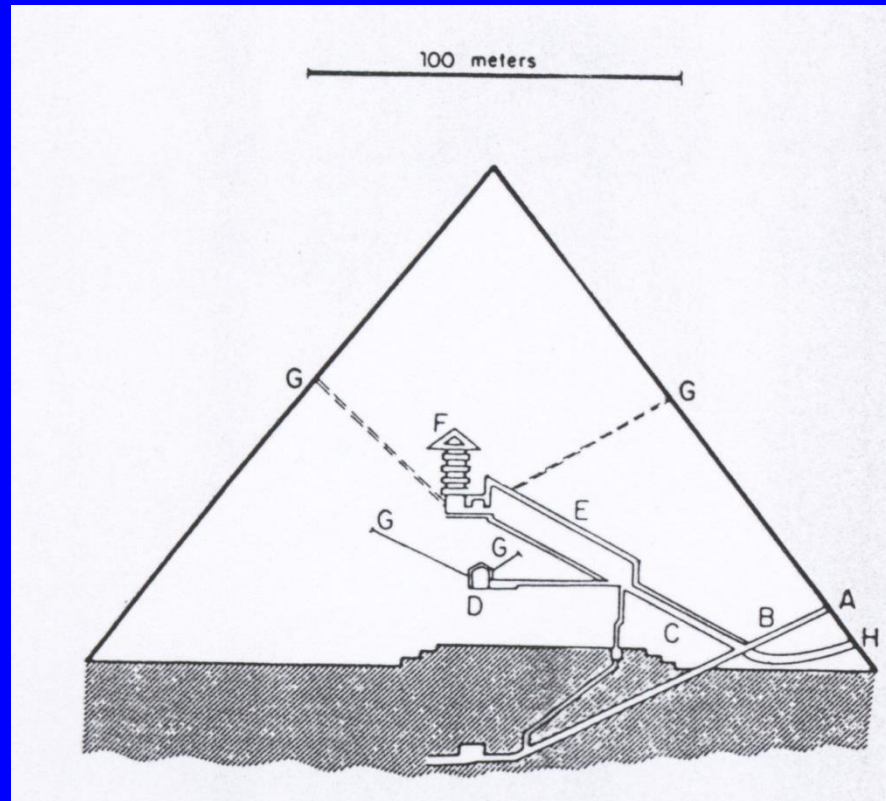
2008,

1 crypt detected
(should be verified)



Cheopsova pyramída, Egypt – francúzsky mikrogr. prieskum

stavba pyramídy

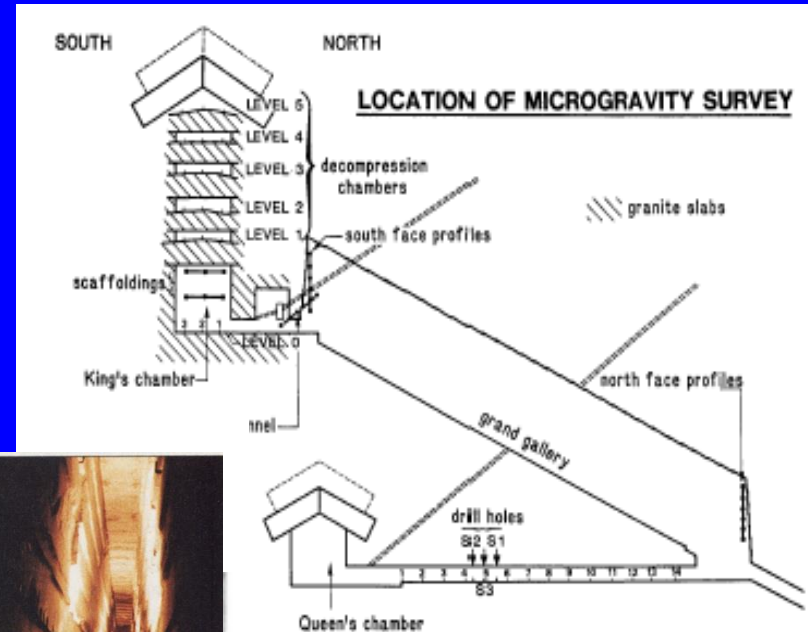


- A. NORTHERN ENTRY
- B. DESCENDING CORRIDOR
- C. RISING CORRIDOR
- D. QUEEN'S CHAMBER
- E. LARGE GALLERY

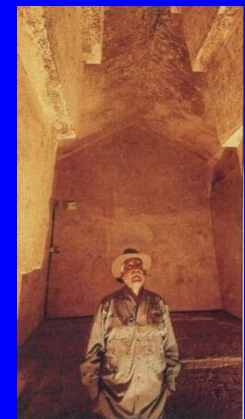


samotné meranie

merané priestory



veľká galéria

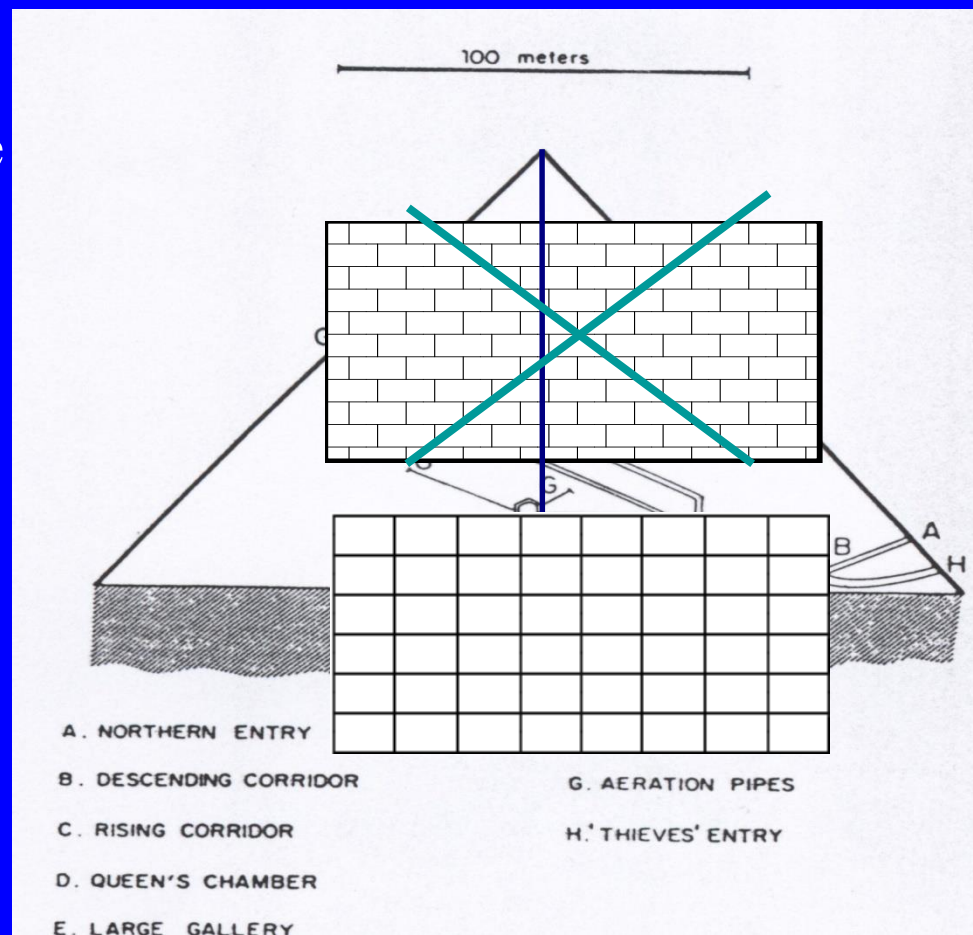


kráľovská komnata

Cheopsova pyramída, Egypt – francúzsky mikrogr. prieskum

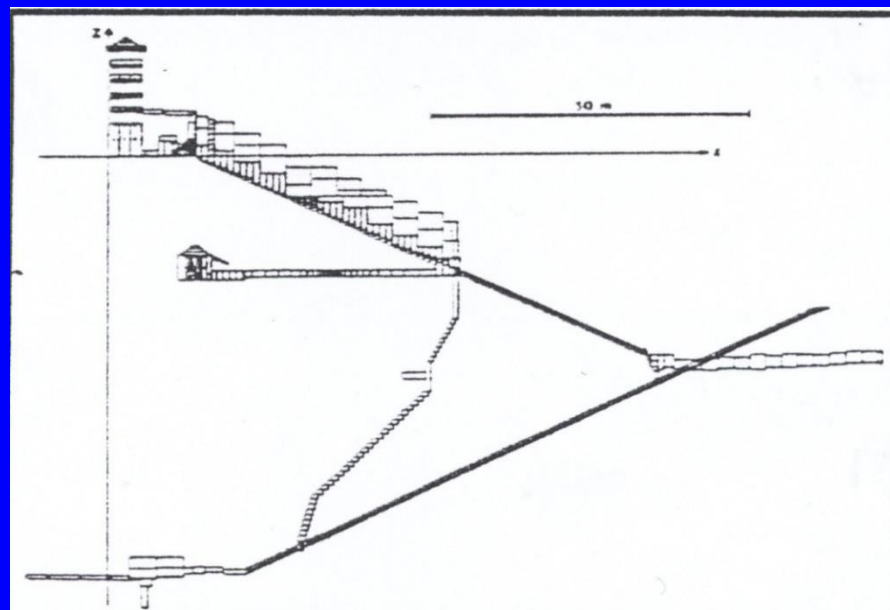
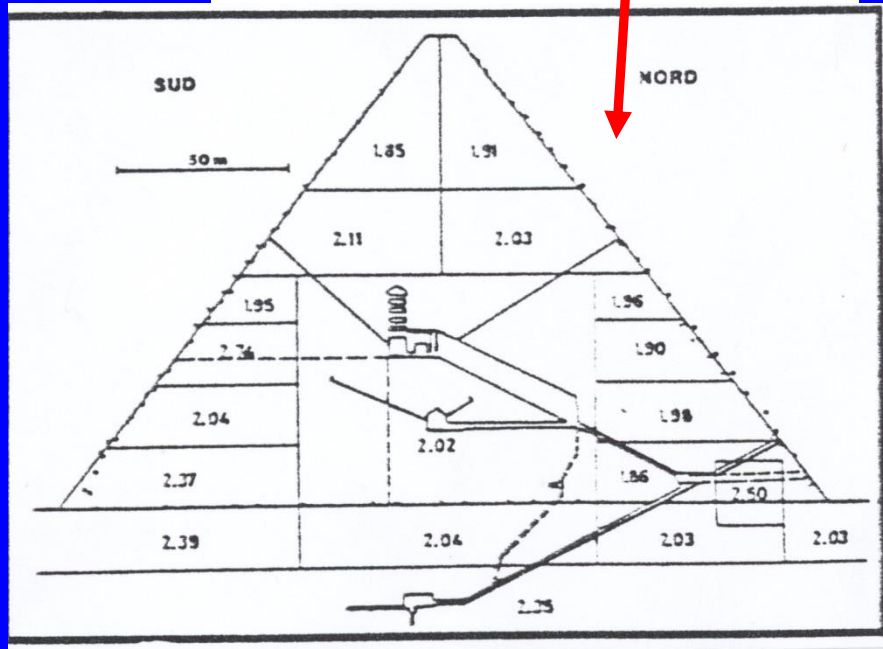
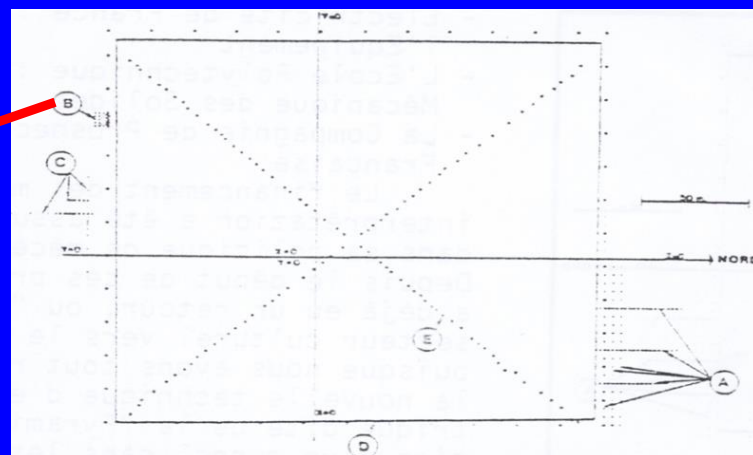
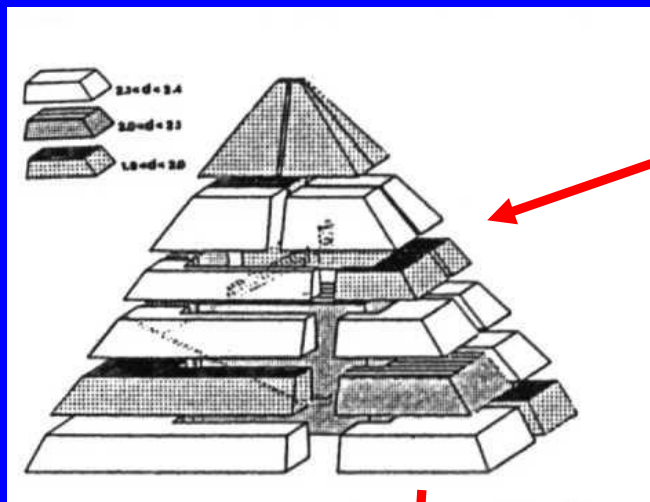
„argumenty“ pre naštartovanie projektu – architektonické „anomálie“ v stavbe pyramídy:

- poloha „Kráľovskej“ komnaty: jej stred neleží úplne presne na vertikále prechádzajúcej vrcholom pyramídy,
- polohy kvádrov v chodbe ku „Kráľovninej“ komnate nemajú typický tehlový vzor,
- príliš veľká „dekompresná štruktúra“ nad „Kráľovskou“ komnatou .
- pôvodný vstup do pyramídy má na začiatku upadajúcu chodbu



tvorba NBA: odstránenie gravitačných účinkov známych štruktúr

meranie na hranách pyramídy



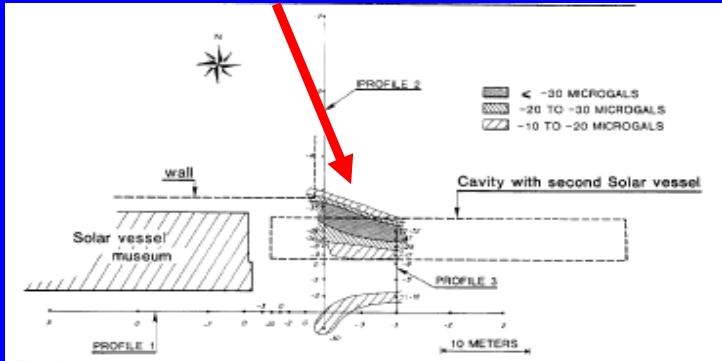
model hustotného „rozvrstvenia“ pyramídy

modelovanie účinkov známych dutín

Cheopsova pyramída, Egypt – francúzsky mikrogr. prieskum

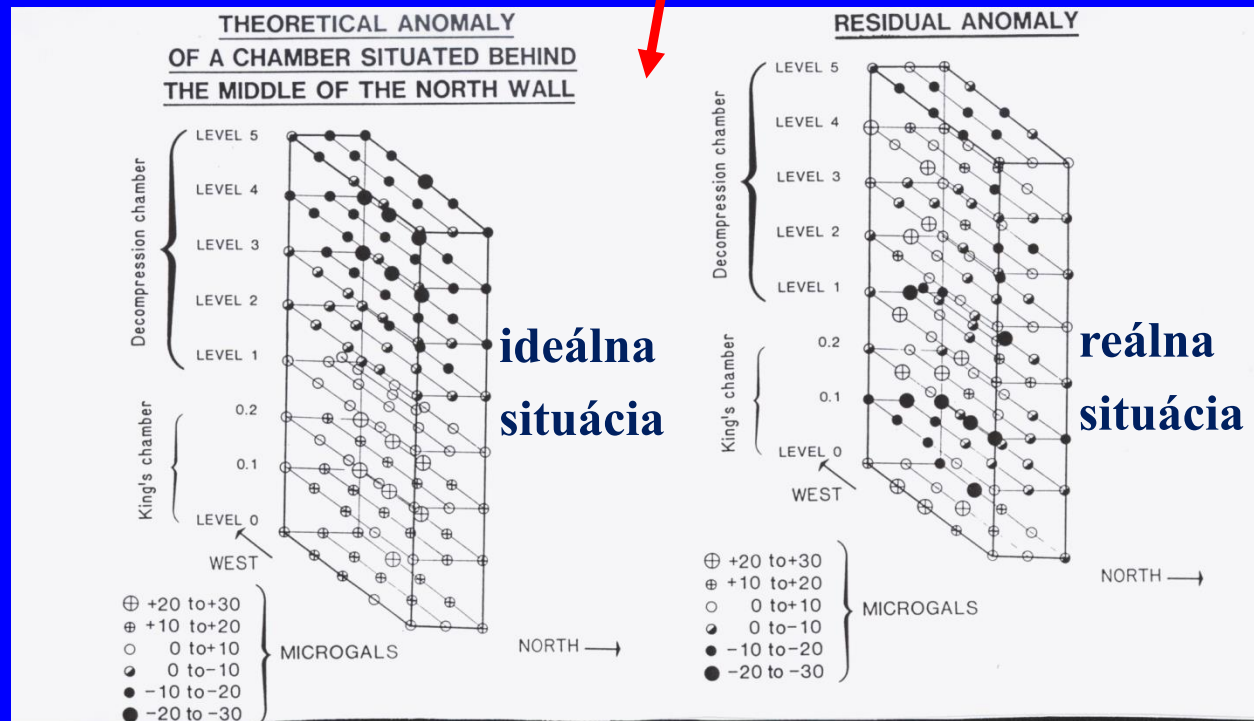
výsledky (1/3)

overenie dutiny so slnečným
plavidlom faraóna



čiasťkový výsledok:

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

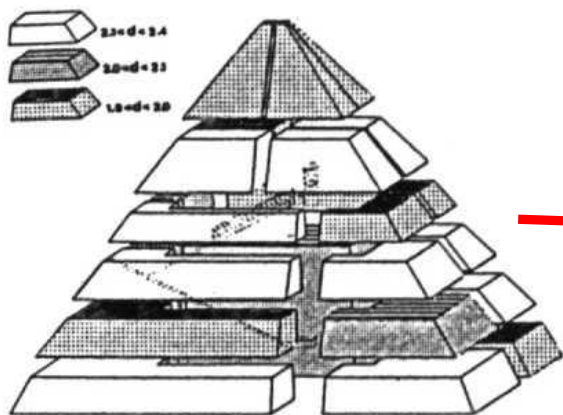


Cheopsova pyramída, Egypt – francúzsky mikrogr. prieskum

výsledky (2/3)

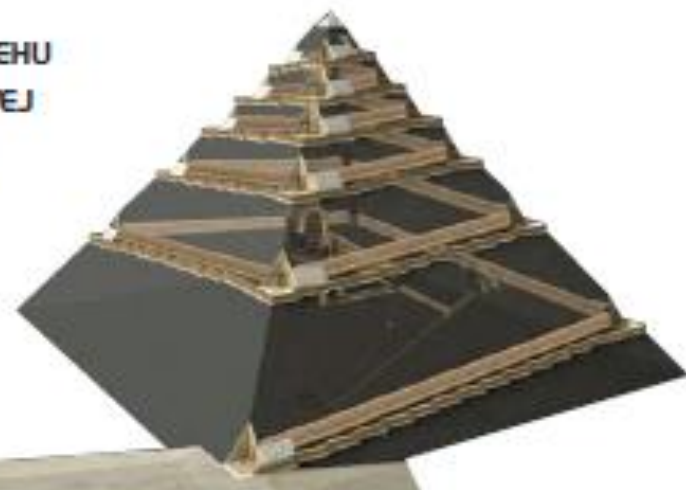
čiasťkový výsledok (v oblasti archeologickej hypotézy):

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



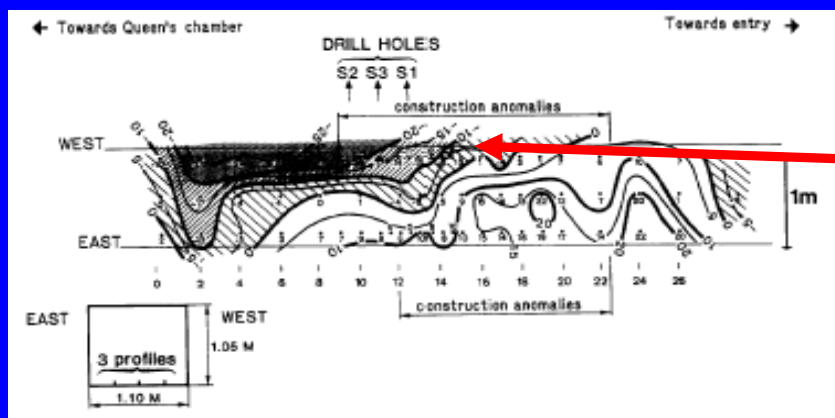
Densities of the large block structure of the Cheops Pyramid.

INTERPRETÁCIA PRIEBEHU
VNÚTORNEJ ŠPIRÁLOVEJ
RAMPY V CHUFUOVEJ
PYRAMÍDE



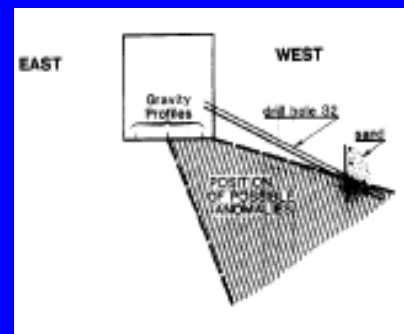
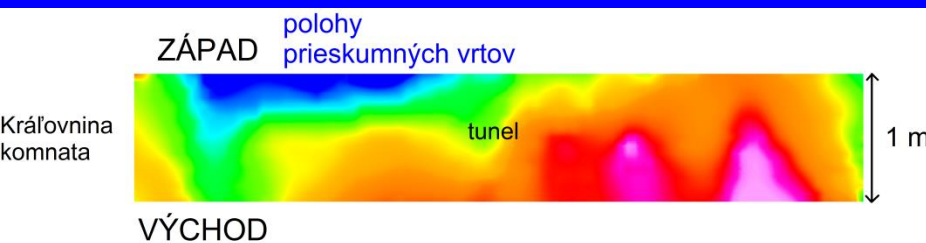
Cheopsova pyramída, Egypt – francúzsky mikrogr. prieskum

výsledky (3/3)



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 m³)**

Príspevok geofyziky pri lokalizácii archeologických objektov

Záver:

- meranie geofyzikálnych polí pomáha archeológom objavovať skryté štruktúry pod zemským povrchom a šetrí tak výkopové práce (tým aj financie),
- ak je to len možné, najlepšie je použiť kombináciu viacerých metód (ktoré sa dopĺňajú alebo si odporujú),
- toto odvetvie geofyziky zažíva v súčasnosti vo svete veľký „boom“ (aj u nás) a existuje v ňom veľa výziev na vývoj nových postupov a metód,
- veľmi nám pomáha spolupráca so zahraničím a značné nádeje vkladáme do pozitívneho vývoja u nás,
- značné možnosti pri ochrane a digitalizácii kultúrneho dedičstva.

Zuzana Felcanová – Michal Felcan – Tibor Lieskovský

ARCHEOLÓGIA NEVIDITEĽNÉHO

Prípady nedeštruktívneho výskumu v archeológii



Nová kniha od slovenských autorov:

Felcanová a kol.:

Archeológia neviditeľného,
2021

Príspevok geofyziky pri lokalizácii archeologických objektov

špeciálne poďakovanie:

- Dr. J. Tirpákovi a Dr. I. Kuzmovi z Archeologického Ústavu SAV Nitra,
- Dr. J. Stanleymu z austrálskej firmy GTL-GAP v Brisbane,
- doc. Peťovi Milovi z MU Brno,
- ing. Terrayovi z firmy Terra Košice,
- Mgr. Michalovi Felcanovi z PÚ Bratislava,
- spolupracovníkom z Prif UK,
- projektu INCA v rámci programu LLP-Erasmus Európskej komisie,

za poskytnutie materiálov použitých v tejto prezentácii

Roman Pašteka, Prírodovedecká fakulta UK Bratislava
roman.pasteka@uniba.sk

Ďakujem za pozornosť!