

Vratislav BLECHA¹, Jiří DOHNAL², Zdeněk JÁNĚ³, Jaroslav KNĚZ⁴, Jan VILHELM⁵,
Ladislav ZIMA⁶

HRÁDEK V LIBOMYŠLI U BEROUNA: PRAVĚKÁ MOHYLA NEBO PŘÍRODNÍ ELEVACE?
(VÝSLEDKY GEOFYZIKÁLNÍHO VÝZKUMU)

HRÁDEK IN LIBOMYŠL NEAR BEROUN: PREHISTORIC BURIAL-MOUND OR
NATURAL HILL?
(RESULTS OF GEOPHYSICAL RESEARCH)

Abstract

The objective of geophysical exploration was to find out whether the marked morphological elevation of circular shape (130 m in diameter, 20 m high) is a natural geological structure or a man-made ancient burial mound. The anthropogenic nature is supported by numerous archaeological findings in its environs. Nevertheless, a range of applied geophysical methods (gravimetry, shallow refraction seismic and multielectrode resistivity profiling) proved natural origin of the elevation resulting from selective weathering of more resistant horizon of silicified sandstones of the Kosov Formation as compared with much softer shale of the Králův Dvůr Formation.

Key words: geophysical exploration, archaeological research

Úvod

Při východním okraji obce Libomyšl (nedaleko Berouna) vystupuje z rovinatého terénu morfologicky výrazný homolovitý vrch s názvem Hrádek. Jeho průměr je přibližně 130 m a výška cca 20 m, ve vrcholové části jsou patrné terénní úpravy související s výstavbou gotické tvrze (částečně zachován obvodový val a příkop). Tvar morfologické elevace, její umístění v krajině a řada pravěkých nálezů v okolí naznačovaly, že se může jednat o uměle vytvořenou vyvýšeninu – nasýpanou pohřební mohylu snad ze 6.-5. století př.n.l., samotná lokalita nicméně nebyla dodnes archeologicky zkoumána.

Základním cílem a úkolem realizovaného geofyzikálního výzkumu bylo proto ověření materiálového charakteru elevace „Hrádku“, tj. stanovení, zda se jedná o přírodní geologický útvar nebo o uměle nasýpanou antropogenní „mohylu“; vedlejším záměrem byla detekce a lokalizace možných relikvů zaniklých historických, případně i prehistorických objektů.

Geologické poměry

Zkoumaná lokalita se nachází v centrální části Barrandienu a skalní podloží jejího širšího okolí budují horniny ordoviku. Vlastní prostor Hrádku tvoří podle geologických podkladů sedimenty kosovského souvrství, charakteristické střídáním pískovců, drob a písčitých břidlic (Havlíček 1985), obecně tedy horniny relativně odolnější proti zvětrávání. V okolí elevace vystupují sedimenty královovského souvrství - litologicky se jedná o snáze zvětrávající šedé a zelenavé jílovité břidlice. Již v průběhu měření byl ve svahu západně od vrcholu Hrádku zjištěn nevelký skalní výchoz zvětralých břidličnatých hornin. Toto zjištění primárně dokládá, že elevace Hrádku jako celek nemohla být vytvořena uměle. Nezpevněný kvartérní pokryv zastupují relativně značné mocnosti uloženin charakteru deluvií (pleistocenní, převážně hlinitokamenité sedimenty), lokálně lze předpokládat i přítomnost antropogenních uloženin o neznámé mocnosti a rozsahu, v okolí elevace jsou známy fluviaální šterkopisky říčky Litavky.

¹ RNDr., CSc., oddělení užitě geofyziky ÚHIGUG, PfF UK Praha, Albertov 6, Praha, vblecha@natur.cuni.cz

² RNDr., oddělení užitě geofyziky ÚHIGUG, PfF UK Praha, Albertov 6, Praha, dohnalj@natur.cuni.cz

³ RNDr., oddělení užitě geofyziky ÚHIGUG, PfF UK Praha, Albertov 6, Praha, janezde@natur.cuni.cz

⁴ Doc., RNDr., CSc., oddělení užitě geofyziky ÚHIGUG, PfF UK Praha, Albertov 6, Praha, knezj@natur.cuni.cz

⁵ Doc., RNDr., CSc., oddělení užitě geofyziky ÚHIGUG, PfF UK Praha, Albertov 6, Praha, vilhelm@natur.cuni.cz

⁶ RNDr., CSc., oddělení užitě geofyziky ÚHIGUG, PfF UK Praha, Albertov 6, Praha, lz@natur.cuni.cz

Volba geofyzikálních metod

Pro ověření či vyvrácení hypotézy o umělém původu elevace Hrádku byl použit komplex tří nezávislých geofyzikálních metod, a to přesné gravimetrie, mělké refrakční seismiky a multielektrodové odporové metody. Komplexní použití uvedených metod zaručilo nejen objektivní zhodnocení základní hypotézy, ale i zjištění dalších informací o přítomnosti archeologicky významných nehomogenit, ať už předhistorického či středověkého původu.

Vzhledem ke značné rozloze zájmového území byla lokalita proměřena pouze pomocí jednoho geofyzikálního profilu P o délce 160 m, který přešel „mohylu“ v celém rozsahu ve směru Z-V a přesahoval i do jejího bezprostředního okolí (obr. 1).

Metodika a výsledky měření

Gravimetrie

Pro gravimetrické měření byl použit mikrogalový gravimetr Scintrex CG-3M (Scintrex Ltd., Kanada), krok měření byl zvolen 5 m. Střední kvadratická chyba tíhových měření zjištěná na základě 5 % opakovaných bodů byla $\pm 0,004$ mGal. Všechny gravimetrické body byly výškově zaměřeny.

Z naměřených dat byly spočítány Fayeovy anomálie a relativní Bouguerovy anomálie pro redukční hustotu $2,57 \text{ g/cm}^3$. Z Bouguerových anomálií byl poté odečten vypočítaný gravitační účinek terénní elevace a odstraněn lineární regionální trend. Takto zjištěné reziduální anomálie vymeziły lokální hustotní nehomogenity pod povrchem.

Stanovení průměrné hustoty materiálu zkoumané terénní elevace umožnila kvantitativní interpretace naměřených Fayeových anomálií, pro modelování Fayeových anomálií byl použit program GM-SYS ve 2,75-D variantě. Tento způsob modelování dovoluje zohlednit délky modelovaných bloků ve směru kolmo k profilu a rovněž dovoluje modelovat geologické jednotky, které se vyskytují mimo interpretační profil.

Hustotní poměry

Pro přesnost interpretace gravimetrie jsou klíčové údaje o hustotách hornin. Hustoty ordovických hornin Barrandienu (Ibrmajer, Suk et al. 1989) uvádí následující tabulka:

Tab.1 Hustoty ordovických hornin Barrandienu podle Ibrmajera, Suka et al (1989). n - počet vzorků, ρ_0 - hustota objemová, ρ_m - hustota mineralogická, ρ_n - hustota přirozená, p - porozita, s - standardní odchylka.

hornina	n	ρ_0	s	ρ_m	s	ρ_n	s	p	s
		g/cm^3		g/cm^3		g/cm^3		%	
pelit	295	2,46	0,12	2,71	0,05	2,55	0,10	9,1	4,6
prachovec	116	2,5	0,08	2,70	0,03	2,57	0,05	7,3	3,2
psamit	235	2,53	0,10	2,66	0,04	2,58	0,09	5,0	3,8
křemenec	236	2,57	0,04	2,64	0,03	2,59	0,04	2,9	2,5
paleobazalt	30	2,66	0,11	2,78	0,06	2,70	0,08	4,5	3,6
tuf	54	2,56	0,14	2,78	0,09	2,64	0,10	7,7	5,5

Prvním úkolem gravimetrie bylo stanovit hustotní charakter materiálu terénní elevace a rozhodnout, zda se jedná o přírodní útvar či antropogenní objekt (mohylu). Pro tento účel byly spočítány Fayeovy anomálie, ve kterých je zachován gravitační účinek terénu. Tento účinek u výrazné terénní elevace silně převažuje nad účinkem hustotních nehomogenit v hloubce pod povrchem. Během kvantitativní interpretace byly naměřené Fayeovy anomálie porovnávány s gravitačním účinkem modelu terénní elevace, u kterého byla postupně měněna hustota tak, aby bylo dosaženo optimální shody naměřených a vypočtených hodnot (kvantifikováno pomocí střední kvadratické chyby naměřených a vypočtených hodnot). Nejlepší shody bylo dosaženo v případě, kdy samotná terénní elevace byla modelována s hustotou $2,61 \text{ g/cm}^3$ a okolní horniny s hustotou 2,57

g/cm^3 . V tomto případě činila střední kvadratická chyba 0,031 mGal. Modelovaná diferenční hustota mezi terénní elevací a okolím přitom odpovídá diferenci v přirozených hustotách mezi ordovickými pelity a psamity tak, jak jsou uvedeny v tabulce 1. Ještě lepší shody bylo dosaženo, jestliže materiál s hustotou $2,61 \text{ g/cm}^3$ byl modelován i pod terénní elevací - do hloubek kolem 500 m. V tomto případě byla střední kvadratická chyba 0,021 mGal. Pro volbu hustoty terénní elevace $2,20 \text{ g/cm}^3$, což je hodnota která by odpovídala navezenému a zhutněnému materiálu, byla shoda hodnot mnohem horší a střední kvadratická chyba činila 0,122 mGal. Výsledky modelování jsou zachyceny na obr. 2.

Z uvedených skutečností vyplývá, že zkoumaná terénní elevace Hrádek není (alespoň jako celek) tvořena antropogenním materiálem a není tedy mohyloou. Jedná se o přírodní útvar tvořený patrně psamitickými, místy prokřemenělými, horninami ordoviku, který vznikl v důsledku hlubší denudace okolních měkkých pelitických hornin.

Reziduální část Bouguerových anomálií (obr. 3) indikuje pozici lokálních hustotních nehomogenit. Na obrázku jsou zvýrazněny oblasti lokálních záporných anomálií, tj. místa s relativním deficitem hmoty vůči svému okolí. Nejvýraznější hustotně deficitní zóna se nachází na vrcholu elevace a její příčinou je pravděpodobně to, že vlastní vrcholek kopce je tvořen navezeným antropogenním materiálem s nižší hustotou než podložní horniny. Mocnost navezeného materiálu je však malá, řádově první metry. Kombinace kladné lokální anomálie v metráži 120 a přilehlé záporné anomálie v metráži 130 souvisí se středověkým opevněním: kladná anomálie je v místě příkopu (podloží blíže k povrchu), záporná anomálie v oblasti valu nad příkopem (méně zhutněný materiál). Úzká hustotně deficitní zóna na západním svahu elevace může teoreticky indikovat sesutý či přisýpaný materiál na úpatí kopce, případně zasýpaný výkop apod.

Mělká refrakční seismika

Seismické měření bylo provedeno metodou mělké refrakční seismiky pomocí 24 kanálové seismické aparatury Geode (Geometrics, USA) a úderového zdroje seismické energie. V linii profilu P byla realizována dvě seismická roztažení s překryvem, na každém roztažení bylo provedeno celkem 9 bodů úderů, body uzemnění geofonů byly vzdáleny 4 m.

Při zpracování seismického měření bylo nutné uvažovat i výškový průběh reliéfu terénu, neboť vzhledem k délce seismického měřicího uspořádání a tvaru reliéfu docházelo ke geometrickému pronikání seismických vln. Naměřené hodochrony v podložním prostředí odpovídaly svým charakterem spíše refragovaným než lomeným vlnám, proto bylo vlastní zpracování provedeno metodou tomografické inverze. Tomografické zpracování vychází z modelu plynulé změny rychlosti do hloubky a je schopné brát v úvahu i výškový průběh reliéfu. V daném případě se nejednalo o pouhou tomografii z povrchu, ale díky konkávnímu reliéfu docházelo ke skutečnému geometrickému pronikání paprsků strukturou. Zásluhou velkého množství bodů měření i bodů úderu bylo dosaženo poměrně velmi hustého a rovnoměrného pokrytí řezu seismickými paprsky. Výsledkem inverze je model - hloubkový rychlostní řez. Vzhledem ke geometrii měření lze hloubkové údaje uvnitř elevace považovat za spolehlivé, do větších hloubek však spolehlivost poněkud klesá. Pro vlastní tomografickou inverzi byl využit program PlotRefa firmy OYO.

Jak dokládá rychlostní řez (obr. 4), charakterizuje zkoumaný prostor do hloubkové úrovně přibližně 270 m n.m. rozpětí rychlosti seismických vln od 350 do 3500 m/s. Rychlost do hloubky téměř plynule roste, tento gradientový nárůst je podmíněn postupně se snižujícím stupněm zvětření podložních hornin. Protože průběh izoliní rychlosti do hloubky 10 až 15 m je generálně konformní s průběhem reliéfu terénu a již v hloubce kolem 4 až 6 m dosahuje rychlost hodnoty 1000 m/s, která odpovídá zvětřalému skalnímu podkladu, lze konstatovat, že elevace Hrádku jako celek je z větší části přirozeného geologického původu. Relativně větší mocnost nezpevněného pokryvu (hlinitokamenité svahové uloženiny) vykazuje západní mírnější svah elevace, relativně méně pokryvu je na východním více strmém svahu. Maximální mocnost nízkorychlostního materiálu byla zachycena v prostoru nasypaného středověkého valu, především však ve vrcholové části elevace, kde lze v souladu s výsledky gravimetrie i multielektrodové metody předpokládat i přítomnost sekundárně navezeného antropogenního materiálu. Za zmínku stojí hluboko uložená (k V skloněná)

vyšokorychlostní elevace v úseku metrů 115 až 150, která je zřejmě geologického původu (prokfemenění).

Multielektrodová odporová metoda

Multielektrodové odporové měření bylo realizováno geoelektrickou aparaturou Resistar RS-100 za použití multielektrodového systému ME-100 (Geofyzika Brno). Vzdálenost mezi elektrodami byla zvolena 2 m, zapojování elektrod odpovídalo Wennerovu uspořádání s přechodem do uspořádání Schlumbergerova.

Naměřená data byla zpracována metodou 2D inverze s opravou na reliéf terénu (program Res2DInv podle Loke & Barker, 1995) do formy odporového řezu. V procesu inverze jsou naměřená data srovnávána s odezvou vybraného modelu prostředí. Parametry modelu jsou poté iteračním postupem na základě metody nejmenších čtverců upravovány tak, až je dosaženo určitého kritéria shody mezi vypočtenými a naměřenými údaji. Výsledkem inverze jsou interpretované odpory a hloubky, které umožňují sestavení odporového řezu.

Rozpětí měrných odporů (10 až 800 ohm) i rozložení odporových nehomogenit v hloubkovém řezu (obr. 5) dobře souhlasí se všemi dosud uvedenými poznatky. V rámci nezpěvněného pokryvu – do hloubky kolem 4 m (ve vrcholové části až 8 m) – se výrazně odlišuje prostředí vně a v prostoru elevace Hrádku. Zarovnaný reliéf při úpatí elevace charakterizuje přípovrchová vrstva výrazně nízkých odporů do 70 ohm, která odpovídá přítomnosti jílovitohlinitých uloženin vzniklých zvětráním jílovitých hornin skalního podkladu. V prostoru elevace tvoří povrchu téměř průběžná poloha o vyšších odporech (první stovky ohm), reprezentující hlinitokamenité svahoviny, které vznikly zvětráním hornin s vyšším zastoupením písčité frakce. V obou svazích vystupují tyto svahoviny až na povrch, odlišná situace je však ve vrcholové partii, kde je poloha vysokoodporového materiálu (s bázi až v hloubce kolem 8 m) překryta vrstvou o nižších odporech (vyšší desítky ohm). Tato vodivější vrstva o mocnosti 3 až 5 m reprezentuje hlinitější uloženiny a může představovat antropogenně redeponovaný materiál, který v neznámé době posloužil k modelaci reliéfu vrcholové partie Hrádku. Překvapující je přítomnost kontrastního oválného subhorizontálního odporového maxima (400 až 600 ohm) s hypocentrem v hloubce kolem 7 m, zachyceného „uvnitř polohy svahovin“ v okolí metrů 92. Projev tohoto charakteru může být vyvolán čoučkou hrubě kamenité sutě, kamenným zdívkem či jeho destrukcí nebo i dutinou. Složitější odporová situace byla zjištěna v prostoru částečně aplanovaného příkopu a valu. Zatímco vrchní část tělesa valu charakterizují odpory vyšší, reprezentující zřejmě hlinitokamenitý materiál, na bázi tělesa valu byly zjištěny odpory nižší, svědčící pro přítomnost hlinitějšího materiálu a absenci hrubých svahovin. Podobný nízkoodporový materiál vyplňuje i částečně zasypaný příkop. Subtilní odporové minimum v malé hloubce bylo zachyceno i západně od vrcholové plošiny, přítomnost zaniklého příkopu v těchto místech je však ryze hypotetická.

Ve skalním podkladu lze na základě odporových poměrů vymezit několik litologických bloků. V západní části profilu vystupují horniny relativně vodivější, patrně jílovité břidlice. Ve střední části profilu, která odpovídá převážné části elevace Hrádku, se nacházejí horniny o odporech vyšších, zřejmě sedimenty s vyšším podílem písčité frakce. Vysoké odpory (150 až 800 ohm) v úseku 74 až 85 naznačují lokálně vyšší stupeň prokfemenění sedimentů a právě v těchto místech byl zjištěn i výchoz skalního podkladu. Podloží východní části profilu tvoří opět horniny vodivější, tedy zřejmě jílovité břidlice.

Závěr

Komplexní geofyzikální průzkum v prostoru lokality Hrádek na katastrálním území Libomyšl přinesl následující faktické poznatky:

- Morfologicky výrazná elevace Hrádek jako celek je podle výsledků všech použitých metod přírodním geomorfologickým útvarem a nikoliv mohylou. Vznik této terénní vyvýšeniny byl podmíněn odlišným geologickým podložím lokality, které tvoří zvětrávání odolnější sedimenty kosovského souvrství s vyšším podílem písčité frakce (lokálně patrně

prokřemenělé), zatímco v okolí Hrádku vystupují snáze zvětrávající jílovité břidlice královovského souvrství. Přirozený původ elevace potvrzuje i skalní výchoz zvětralých břidličnatých hornin nalezený západně od vrcholu Hrádku.

- ❑ Možný antropogenní původ lze nicméně přičíst přípovrchové vrstvě mocné asi 3 až 5 m, která pokrývá vrcholovou partii Hrádku a vykazuje nižší hustotu, rychlost seismických vln i měrný odpor. Tato vrstva představuje patrně převážně hlinitý materiál, který sem mohl být navezený v blíže neznámé době za účelem úpravy reliéfu vrcholové části elevace.
- ❑ Původní kvartérní pokryv tvoří v okolí elevace vodivé jílovitohlinité uloženiny (eluvia podložních jílovitých břidlic), v prostoru elevace méně vodivé hlinitokamenité svahoviny (deluvia jílovitopísčité podložních sedimentů). Mocnost eluviálních až deluviálních uloženin nepřesahuje 5 m. Nedaleko vrcholu Hrádku - v okolí metráže 92 - byla v poloze svahovin zjištěna „čočka“ vysokých odporů neznámého původu (sut', destrukce zdíva, dutina?).
- ❑ Multielektrodové odporové měření prokázalo složitější strukturu tělesa středověkého valu východně od vrcholu Hrádku; svrchní hlinitokamenitý násyp tělesa valu spočívá na podkladu, který je tvořen hlinitějším materiálem.

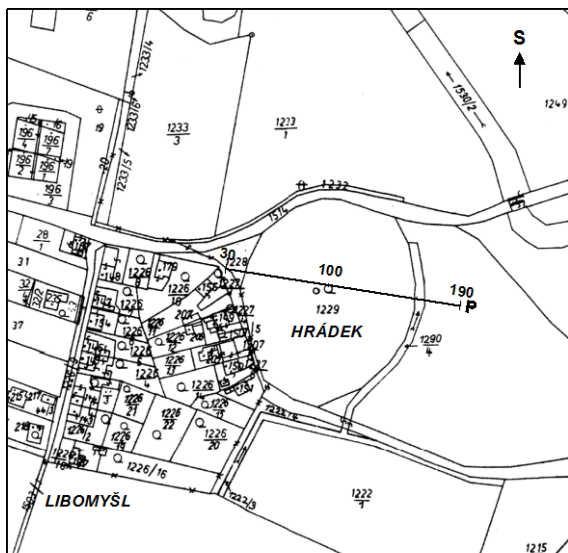
Z metodického hlediska považujeme za nejpřínosnější ověření spolehlivosti 2,75-D varianty modelování Fayových gravimetrických anomálií (program GM-SYS) a seismické tomografické inverze (program PlotRefa) pro morfologicky složitější elevační reliéf terénu. Multielektrodová odporová metoda ukázala svoji nezastupitelnost (i vzhledem k detailnějším krokům měření) zvláště pro vymezení struktury a materiálu drobných mělkých nehomogenit.

Poděkování

Príspevek byl připraven s finanční podporou výzkumného záměru MSMT 0021 620855 a grantu GAČR 205/07/0574.

Literatura

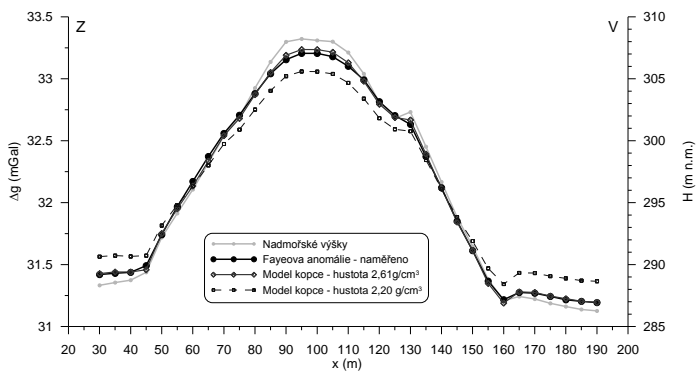
- [1] Havlíček, V. (1985): Základní geologická mapa ČR v měřítku 1:25 000, list 12-431 Hostomice, archiv ČGS.
- [2] Ibrmajer, J., Suk, M. et al. (1989): Geofyzikální obraz ČSSR. – Ústřední ústav geologický, Praha.
- [3] Loke, M. H. & Barker, R. D. (1995): Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. *Geophysics*, 60, str. 1682-1690.



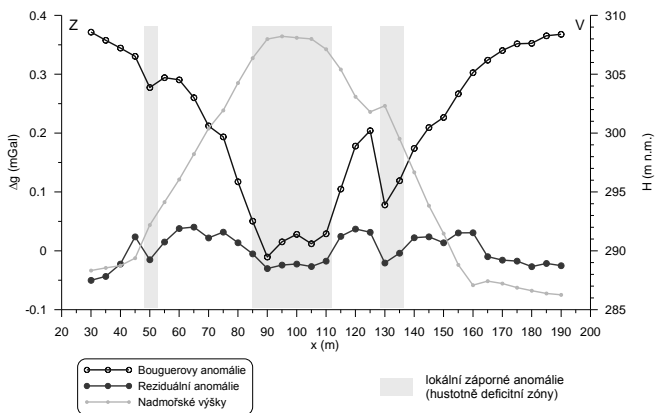
P - geofyzikální profil

0 20 40 60 80 100m

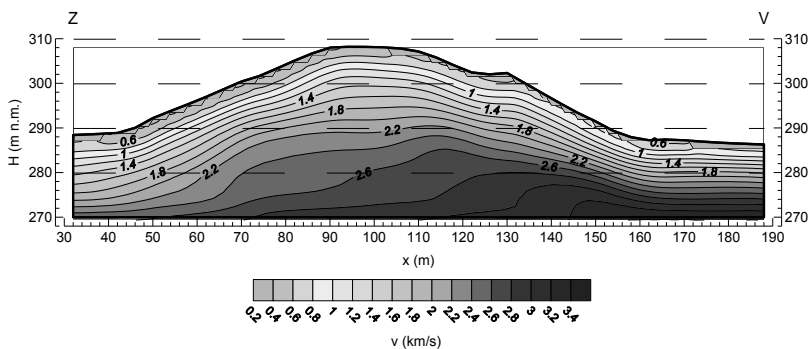
Obr.1 Libomyšl – Hrádek, situace geofyzikálního profilu P.



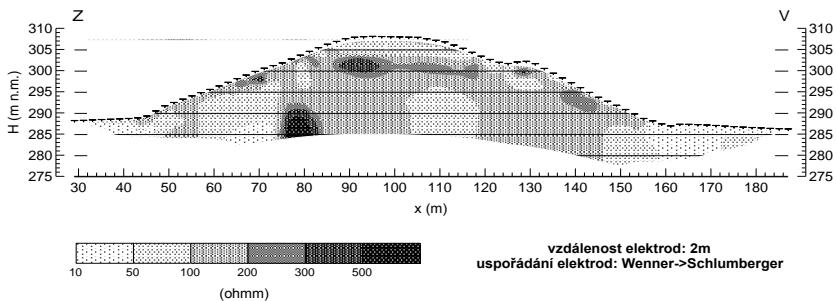
Obr.2 Libomyšl – Hrádek, gravimetrie – kvantitativní interpretace Fayeových anomálií.



Obr.3 Libomyšl – Hrádek, gravimetrie – kvalitativní interpretace Bouguerových anomálií.



Obr.4 Libomyšl – Hrádek, mělká refrakční seismika – tomografický rychlostní řez.



Obr.5 Libomyšl – Hrádek, multielektroková odporová metoda – odporový řez (2D inverze).