

# Prostorové vymezení polohy a objemu struskové akumulace v národní přírodní památce Rudické propadání s pomocí geofyzikálních metod

Position, extent and volume of slag accumulation in the cave system of the Rudice Sinkhole, a National Nature Monument, studied geophysical methods

VÍT BALDÍK<sup>1</sup> – MARTIN DOSTALÍK<sup>2</sup> – JAN SEDLÁČEK<sup>1</sup> –  
ROMAN NOVOTNÝ<sup>1</sup> – DAVID BURIÁNEK<sup>1</sup> – JANA JANDERKOVÁ<sup>1</sup> –  
EVA KRYŠTOFOVÁ<sup>1</sup> – HANA KRUMLOVÁ<sup>3</sup> – JIŘÍ NEČAS<sup>1</sup> –  
KAROLÍNA FAKTOROVÁ<sup>1</sup> – STANISLAV LEJSKA<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Česká geologická služba, Leitnerova 22, 658 69 Brno,  
vit.baldik@geology.cz

<sup>2</sup> Česká geologická služba, Klárov 3, 118 21 Praha 1,  
martin.dostalik@geology.cz

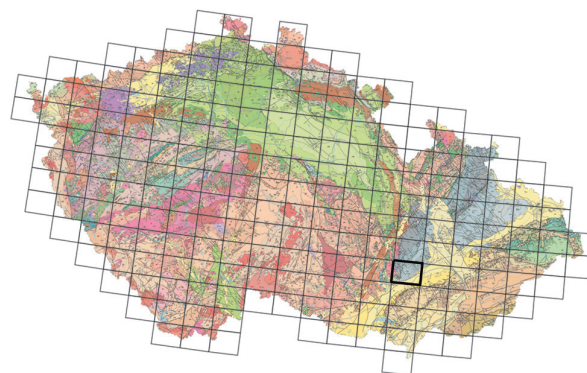
<sup>3</sup> Ústav fyziky Země, Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita,  
Tvrdeho 12, 602 00 Brno, hana.krumlova@ipe.muni.cz

<sup>4</sup> Český hydrometeorologický ústav, pobočka Brno, Kroftova 43,  
616 67 Brno, stanislav.lejska@chmi.cz

Please cite this article as: Baldík, V. – Dostalík, M. – Sedláček, J. – Novotný, R. – Buriánek, D. – Janderková, J. – Kryštofová, E. – Krumlová, H. – Nečas, J. – Faktorová, K. – Lejska, S. (2020): Position, extent and volume of slag accumulation in the cave system of the Rudice Sinkhole, a National Nature Monument, studied geophysical methods. – Geoscience Research Reports, 53, 1, 3–10. (in Czech)

**Keywords:** The Rudice Sinkhole, stream sink, geophysical survey, electrical resistivity tomography, vertical electrical sounding, ground penetrating radar, speleothems, slag volume

**Summary:** The Rudické propadání National Nature Monument (The Rudice Sinkhole) has been strongly affected by slag material washed down from the disturbed slag heaps, then transported by intermittent stream and redeposited in the gully called “Ve Struskách” (In slags) located upstream the sinkhole. Slag from a nearby old iron foundry was dumped on the slopes of the gully in the 19th century. During some heavy rainfall events, the slag was occasionally washed down into an episodic stream channel entering the local karst system near the Rudice Sinkhole. There are many similar slag heaps contaminating the Protected Landscape Area of Moravian Karst. The slag drained into the karst system and caves damages mechanically the karst dripstone and sinter decoration and makes

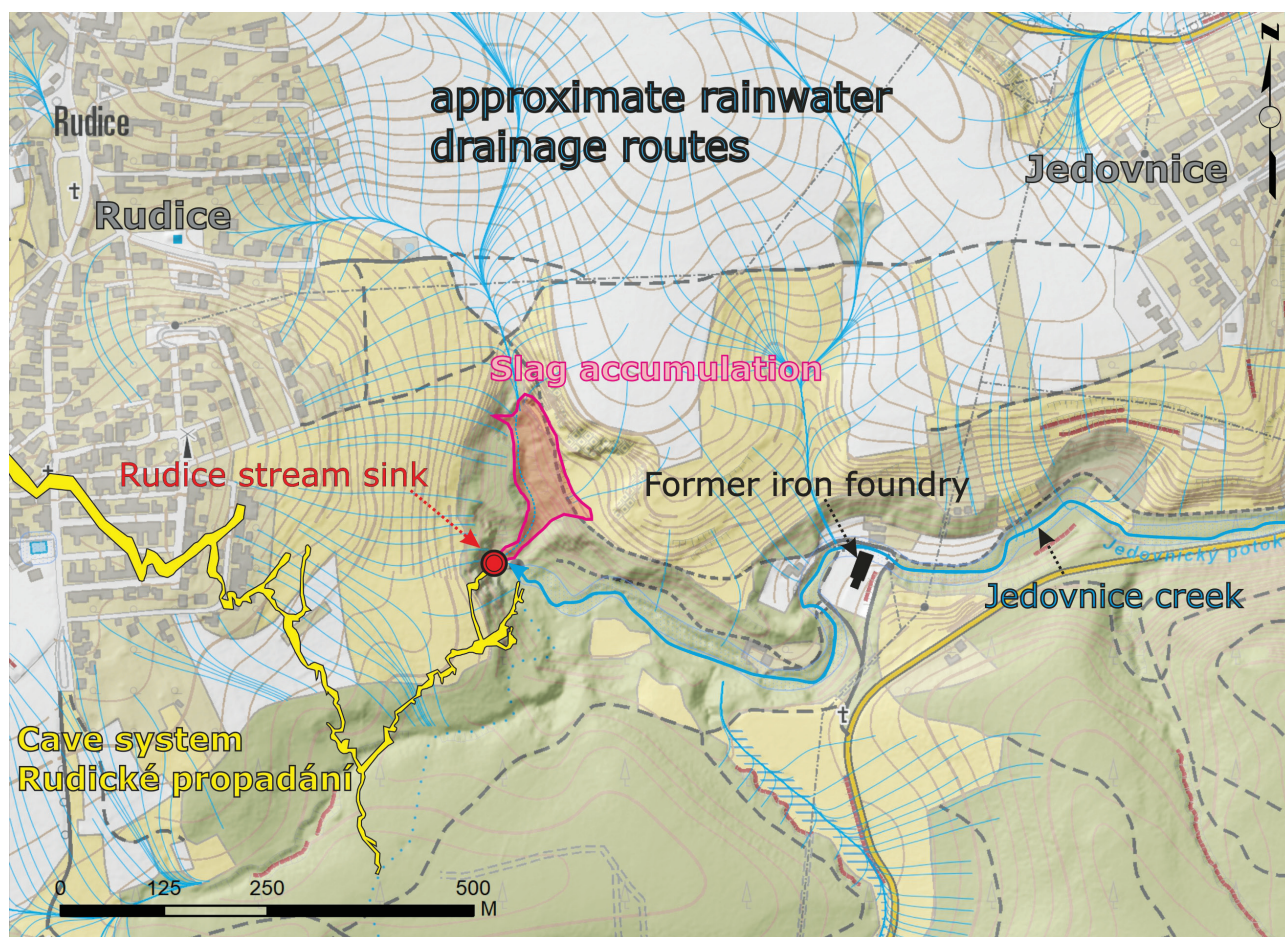


(24-41 Vyškov)

difficult the movement of speleologists investigating the caves. One of the major project objectives was to establish the total volume of the deposited slag for the purpose of the management of the Moravian Karst Protected Landscape Area. Exploratory drilling of slag heaps and redeposited slag material is thought to be inappropriately expensive in such a difficult rough topography. Consequently, several geoelectrical methods exploiting differences in resistivities of various geoelectric bodies were selected and used to determine the thickness of different parts of the slag deposition. The considered geophysical model consists of 3 major quasi-homogeneous geoelectric layers: slag accumulation, Quaternary sediments, and the underlying limestone. The results of the applied electrical resistivity tomography (ERT), vertical electrical sounding (VES), and ground penetrating radar (GPR) together with field mapping and test pits provided a sufficient amount of data to establish the areal extent and thickness of the slag material deposited in the area investigated. Moreover, the GIS analyses of local topography, insertion of geophysical measurements together with an overall interpretation of the obtained data gave interesting results leading to a new assessment of the extent and thickness of the deposited slag. On the other hand, if the issue of the old burden related to the distribution and deposition of slag material would be not resolved, it may endanger the major subject of environmental protection of the Moravian Karst Protected Landscape Area as a whole.

Zájmové území představuje klasické slepé krasové údolí kaňonovitého charakteru s nejmohutnějším aktivním ponorem v České republice, které leží v NPP Rudické propadání. Celý jeskynní systém, mezi ponory v Rudickém propadání a vývěry u Býčí skály, v současnosti měří 13 km, přičemž Jedovnický potok se svými přítoky protéká cca 6 km hlavních aktivních chodeb.

Pro studium byl zvolen boční žleb s místním názvem „Ve Struskách“, který je vyplněn struskou a dnes představuje již jen občasný pravostranný přítok Jedovnického potoka z Rudické plošiny. Tato strusková halda se nachází cca 20 m severovýchodně od ponoru Jedovnického potoka, jehož vody splachují struskový materiál do jeskynního systému (obr. 1). Struska už byla provlečena celým systémem



Obr. 1. Mapa zájmového území se zobrazením pozice struskové deponie „Ve Struskách“ (růžový polygon). Žlutou barvou je vyznačen jeskynní systém Rudické propadání – Býčí skála. Tenké modré linie znázorňují přibližné linie povrchového odtoku (© mapy.vumop.cz), mapový podklad tvoří ZABAGED (© ČÚZK 2019, upraveno).

Fig. 1. Map of the area of interest with location of the slag accumulation “Ve Struskách” (pink polygon). The Rudické propadání cave system – the Býčí skála cave is marked by yellow color. Thin blue lines show approximate route of rainwater drainage (cf. mapy.vumop.cz), Topographic map taken from Fundamental Base of Geographic Data (ZABAGED) (cf. ČÚZK 2019, modified).

jeskynní ven až do Křtinského údolí pod vývěry Jedovnického potoka. Železářské strusky pocházejí z dřevouhelné vysoké pece Salmovy huti.

Salmova, někdy také Hugova huť, založená v roce 1746 hrabětem Antonínem Hugem Salmem, produkovala železo, jehož vedlejším produktem je metalurgická struska (směs oxidů kovů), která vzniká při tavení a rafinaci kovů. Zdejší provoz dosáhl vrcholu kolem roku 1812, kdy se zde v průměru zpracovalo cca 1500 tun rudy ročně (Štěpánek 2013). Ještě v roce 1857 se zde vyrobilo 1359,23 tun železa, což odpovídá produktivitě 4356 kg za den (Stránský et al. 2007).

Struska vzniká v množství 200 až 1000 kg na 1000 kg surového železa a má řadu využití ve stavebnictví (Jirásek – Vavro 2007). Při této produkci vznikaly řádově první stovky tun strusky ročně a nevyužitá část byla vyvážena do žlebu v blízkosti Rudického propadání. Struska se používala ke zpevnění příjezdových cest k Salmově huti a zbytek byl vyvážen cestou kolem vápencových skal směrem k Rudici a sypán do žlebu situovaného vlevo od této cesty, který směřuje přímo k ponoru Jedovnického potoka.

V rámci projektu „Vymezení pozice a zhodnocení rizikovitosti struskové deponie v NPP Rudické propadání“ byl v roce 2017 proveden pilotní geofyzikální průzkum východního svahu severojižního údolí, který je pokryt volně sypaným nesoudržným materiálem. Tento materiál nebyl nijak hutněn a dochází k jeho pravidelnému sesypávání do koryta potoka. Pohyb je pravidelně eskalován dotací srážkových vod, které v mezivrstevním prostoru zvyšují pórový tlak a snižují efektivní pevnost partikulární látky při neměnném totálním normálovém napětí. Dynamiku transportu umocňuje také její relativně nízká specifická objemová hmotnost od 900 kg/m<sup>3</sup> (u netříděné v kusech 0–22 mm) po 1800 kg/m<sup>3</sup> (v kusech 30–70 mm). Úhel vnitřního tření strusky udávají tabulky 30–40°, bude se lišit podle ulehlosti v daném místě (Hořejší – Šafka 1987). U zemin je hodnota objemové hmotnosti až 2200 kg/m<sup>3</sup>. Při nasycení vodou může docházet k nadlehčování vztlakem vlivem Archimédova zákona. Toto zvyšuje náchylnost strusky k erozi a svahovým pohybům.

Struska je významným antropogenním činitelem, který ovlivňuje celý jeskynní systém Rudické propadání – Býčí

skála. V rámci posouzení vlivu mobilizace chemických složek byla provedena geochemická analýza struskového materiálu. Na základě jeho výsledků se nepředpokládá, že dosažené koncentrace kovů v krasových vodách budou rizikové. Z environmentálního hlediska tedy představuje struska především zdroj klastického materiálu, který znečišťuje jeskynní systém a ohrožuje speleotémy mechanickou abrazí (Baldík et al. 2018).

Jedním z cílů projektu bylo zjistit prostorovou distribuci struskového tělesa pro stanovení kubatury uloženého materiálu a také zpřesnit představu o geologické skladbě území pro rekonstrukci paleoreliéfu terénu před navršením antropogenního odvalu. Numerické stanovení prostorové distribuce struskové deponie je nezbytným podkladem plánu péče pro toto krasové území, kde při nevyřešení této historické zátěže hrozí narušení hlavního předmětu jeho ochrany. Tím je území NPP Rudické propadání.

## Geologická a hydrogeologická situace studovaného území

Geologické podloží studovaného území je tvořeno vilémovickými vápenci macošského souvrství devonského stáří. Z pohledu kvartérní geologie jsou zajímavé relikt pleistocenních písčitých šterků po obou stranách Jedovnického potoka (Otava et al. 2013).

Z hydrogeologického hlediska leží NPP Rudické propadání v oblasti rozšíření krasovo-puklinového kolektoru vázaného na devonské vápence Moravského krasu, které vytvářejí specifické hydrogeologické prostředí se zastoupením různých typů porozity, od puklinové přes krasové puklinovou až po otevřené krasové kanály a jeskynní systémy. Zkrasování probíhá postupným rozšiřováním puklin, mezivrstevních ploch a zlomů a rozpouštěním horniny až do té míry, že výrazná část vody proudí takto vytvořenými kanály. Vzniká efektivní sběrný systém, který je v zóně drenáže odvodňován jediným hlavním kanálem. V takto organizovaném prostředí krasového podzemí se může případně znečištění rychle a nekontrolovatelně šířit díky rychlému proudění podzemní vody v otevřených kanálech s nízkou samočisticí schopností, a krasové hydrogeologické systémy jsou proto extrémně zranitelné antropogenními zásahy. Místa nejsnadnějšího vstupu kontaminantů do krasových zvodnělých systémů jsou bodové ponory vodních toků přitékajících ze sousedních nekrasových oblastí, ponor Jedovnického potoka (Rudické propadání) je jedním z nejvýznamnějších ponorů Moravského krasu.

Úzké údolí či strž zde označovaná jako žlíbek „Ve Struskách“ představuje koryto občasného pravostranného přítoku Jedovnického potoka, do kterého se vlévá těsně před ponorem v Rudickém propadání. V minulosti byl žlíbek aktivně protékán drobným vodním tokem antropogenního původu, který vznikal přetokem odpadních a srážkových vod z ČOV Rudice. V současné době je odtok z ČOV Rudice napojen na ČOV Jedovnice a vodní tok směřující k Rudickému propadání je aktivní pouze za mimořádných srážkových událostí. V nekrasovém prostředí by dno žlebu představovalo lokální drenážní bázi, pravděpodobně s vývěry nebo

průsaky podzemní vody, ať už stálými nebo občasnými. Vzhledem k pozici na krasových vápencích a k blízkosti bodového ponoru, na kterém povrchová voda při vstupu do jeskynních systémů překonává převýšení kolem 90 m, však může být drenážní báze zaklesnuta v podstatně větší hloubce, než je dno žlebu. Ve strusce na dně údolí je vyeroďován cca 190 m dlouhý a 1–2 m hluboký kanál s několika dílčími terasami a mnoha meandry, které podřezávají struskový svah. Erozní tvary ve dně žlíbku a přemístěné akumulace strusky svědčí o tom, že žlíbkem občas za vysokých srážkových úhrnů protéká vodní tok, který eroduje materiál deponice a transportuje ho směrem k soutoku s Jedovnickým potokem a ponorem dále do podzemí.

## Metodika

Vrtný průzkum struskové haldy by byl v těžko přístupném terénu neadekvátně nákladný, proto byl odhad mocnosti struskového tělesa opřen o geofyzikální průzkum. K dispozici je dnes mnoho principiálně odlišných geofyzikálních metod, využívajících rozdílných fyzikálních polí. Liší se pak např. hloubkovým dosahem nebo účinností v různém prostředí. Před terénním měřením je tedy nezbytné vytvořit si konceptuální geofyzikální model reprezentující daný geofyzikální projev. Ten je výhodné numericky namodelovat, pro následné porovnání s výsledky terénního měření. U jednotlivých metod hovoříme o aplikovatelnosti nebo použitelnosti na konkrétní úkol a volíme jejich optimální komplex v závislosti na charakteru konkrétního prostředí a hledané anomálie. Pro vymezení plošného rozsahu strusky se nabízí magnetometrie, která by však přinesla jen minimum informací o mocnosti deponie. V úvahu pak přicházejí geoelektrické metody jako např. metoda vyzvané polarizace (viz. Florschl et al. 2012). Metoda vyzvané polarizace (VP) měří vyvolané napětí na povrchu, které s časem vymizí po vypnutí budicího stacionárního elektrického pulzu. Nejčastěji jsou však na řešení této problematiky využívány odporové metody (Ullrich et al. 2009; Chambers et al. 2012).

Námi prováděný průzkum byl opřen zejména o terénní multielektrodové odporové měření a interpretační metodu Electrical Resistivity Tomography (ERT). Vzájemným měřením stejnosměrného elektrického proudu uzemněného pomocí kovových elektrod a potenciálového rozdílu vyvolaného budicím proudem lze určit změny měrného elektrického odporu v zemním prostředí. Odporový projev je v zásadě výsledkem kombinace mineralogického složení horniny, saturace vodou, pórovitosti, koncentrace roztoků vyplňujících póry, struktury, textury a míry zvětrání (Mareš et al. 1990).

Metoda vertikálního elektrického sondování VES (z angl. Vertical Electrical Sounding) vychází ze stejných principů jako metoda ERT a je v průzkumu vrstevnatého horninového prostředí jednou z nejpoužívanějších odporových metod. Závislost odporu na poloviční vzdálenosti proudových elektrod ( $AB/2$ ) se nazývá odporovou křivkou VES a vzniká postupným vzdalováním proudových elektrod AB od potenčních MN, které zůstávají ve středu

uspořádání, podle přesně daného logaritmického schématu. Inverzní interpretaci křivek VES lze určit mocnosti modelových geoelektrických vrstev v místě sondy, pokud mají dostatečný odporový kontrast. Zvoleno bylo nejefektivnější Schlumbergerovo uspořádání a roztažení po vrstevnici. Při měření série bodů VES podél profilu lze sestavit 2D odporový řez.

Princip metody ground penetrating radar (GPR) je založen na vysílání elektromagnetických pulzů o vysoké frekvenci pod povrch a registraci fázového posunu a času příchodu po odrazu od podpovrchového reflexního rozhraní, které by v tomto případě měl reprezentovat kontakt sprašových hlín a strusky. Čím je rozdíl permitivit dvou materiálů větší, tím kontrastnější je výsledný obraz. Vzduch má hodnotu permitivity 1 s rychlostí 0,3 m/ns, zeminy asi 3–30 s rychlostí 0,15–0,06 m/ns, vápence 4–8 s rychlostí 0,15–0,11 m/ns a voda 81 s rychlostí 0,03 m/ns. GPR tedy rozlišuje materiály s různou vodivostí a permitivitou a lze tak vykreslit jejich hranice. Měříme tedy fyzikální odezvu geoelektrického signálu, na rozdíl od multielektrodové odporové metody, která měří přímo hodnotu zdánlivého měrného odporu.

Na struskové haldě bylo dříve provedeno 2D měření metodou (GPR) aparaturou Loza s anténou 150 MHz s rychlostí 10 cm/ns, a to s použitelnými výsledky (Tengler 2016). Čtyři pilotní profily poskytly orientační představu o hloubce navážky. V období od 20. 3. 2017 do 18. 5. 2017 bylo změřeno 7 ERT profilů o délce 540 m a 5 VES sond. Pro interpretaci jsme také použili 4 GPR profily z dubna 2016 o délce 200 m (obr. 2). Na profilech ERT1 a ERT3 bylo měření po několika měsících opakováno pro ověření validity dat. Rozložení jednotlivých profilů a pozice sond je na obr. 2. K měření obou odporových metod byl použit přístroj ARES II. Při ERT měření bylo použito uspořádání Wenner-Schlumberger s krokem měření 1–2 m. Výsledkem inverzní interpretace ERT dat v programu RES2DINV jsou odporové řezy, tedy vertikální izoomické mapy rozložení měrných odporů, kde hodnoty odpovídají barevné škále. V kombinaci s inverzní interpretací křivek VES v programu IP2Win vzniká interpretovaný geofyzikální model lokality. Interpretace tohoto modelu vychází z rozdílů v měrných odporech zachycených kvazi homogenních geoelektrických vrstev, struktur a těles a z jejich vzájemné pozice v odporovém řezu. Nezbytná klimatická data pocházejí ze srážkoměrných stanic B2BABI01 – Babice a B2BUKA01 – Bukovinka. Prvnímu měření předcházely srážkové události 6. a 16. 3. 2017, kdy napršelo max. 5 mm. Následná měření byla ovlivněna zejména srážkami z 31. 3. a 12. 4. 2017, kdy napršelo až 18 mm a 22 mm. Měření posledního ERT profilu a sond VES 18. 5. 2017 předcházely 3 dny dešťů s průměrným úhrnem srážek cca 6 mm.

Geofyzikální průzkum byl doplněn kopanými sondami. V rámci tělesa struskové haldy byly na 5 lokalitách vyhloubeny sondy o hloubce 1–2 m. V sondách byly zachyceny vrstvy strusky o mocnosti 0,5 až 1 m a o různé zrnitosti, s průměrem klastů 1–10 cm. Při povrchu je struska často promísená s půdou, popř. překrytá vrstvou půdního materiálu. Pedologickou sondáží pomocí ručních zarážených a kopaných sond byl zmapován výskyt strusky v profilech.

## Charakteristika hlavních litologií zastížených ve studované oblasti

Při geofyzikálním průzkumu nelze primárně předpokládat, že geofyzikální obraz bude přesně odpovídat geologické situaci pod povrchem. Interpretaci tedy nelze založit jen na výsledcích měření. Je nutno kombinovat terénní poznatky a zakomponovat je do výsledného modelu. Zde se velkou měrou uplatnilo terénní mapování, při němž lze poměrně jistě vymežit plošnou distribuci strusky a také oblasti s vyšší a nižší mocností, což potvrdily i kopané sondy. Ve studované oblasti byly pomocí kopaných sond a povrchového průzkum zjištěny čtyři hlavní litologické členy, které se odlišují svými odporovými projevy (zjištěno při terénním měření):

(a) Nejmladším litologickým členem je materiál struskové haldy. Dominují zde zelenohnědé a olivově zelené úlomky strusky o velikosti od několika mm po několik dm. Méně časté jsou variety tmavě šedé, šedé, šedo zelené nebo šedobílé. Úlomky strusky mají členitý povrch, na němž jsou často patrné tokové stavby, a obsahují proměnlivé zastoupení vezikul (dutin po plynech). Jedná se o typické vysokopecní strusky, v nichž nacházíme řadu cizorodých součástí, jako jsou úlomky dřevěného uhlí, vyzdívka vysoké pece, zoxidované fragmenty a inkluze železa. Tento pórovitý materiál strusky se sklovitou základní hmotou se vyznačuje vysokými odpory ( $10^2$ – $10^5$  ohm . m).

(b) Kvartérní jíly, sprašové hlíny a půdní pokrýv se také vyznačují nízkým zdánlivým elektrickým odporem ( $10^{-1}$ – $10^3$  ohm . m).

(c) Podložní rozpučené vilémovické vápence macošského souvrství jsou charakterizovány relativně vyšším zdánlivým elektrickým odporem ( $10^3$ – $10^5$  ohm . m).

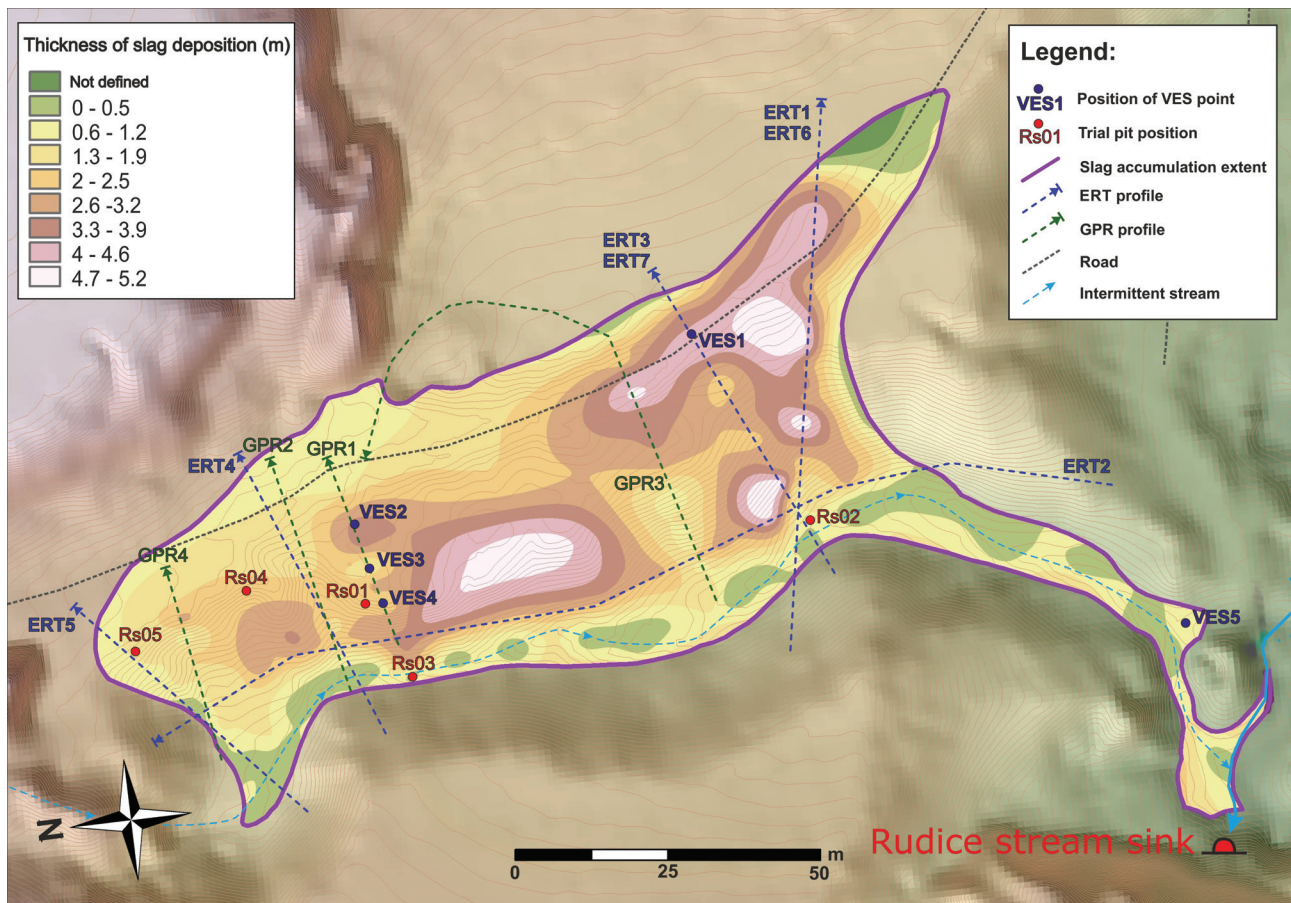
Tuto haldu je možné chápat jako deponii polyfázové vrstveného neuhněného materiálu, který frakcí odpovídá jemnozrnnému až střednězrnnému šterku třídy G2 (dle ČSN 73 1001) s velikostí zrn 2–20 mm, místy většími, a FGr až MGr (dle EN ISO 14688-1). Jde o stále aktivní (vodní erozí pravidelně podemílanou) svahovou deformaci, která se projevuje formou sesypávání (Nemčok et al. 1974).

## Výsledky geofyzikálního průzkumu

Pro interpretaci rozsahu struskové haldy bylo použito 7 ERT profilů, 5 VES sond o maximální délce 200 m, doplněných o starší 4 GPR profily (Tengler 2016). Tyto profily rovnoměrně pokrývají celé těleso s počátkem a koncem mimo struskovou depozici (její ohraničení viz obr. 2). Výsledkem inverzní interpretace ERT dat jsou odporové řezy (obr. 3).

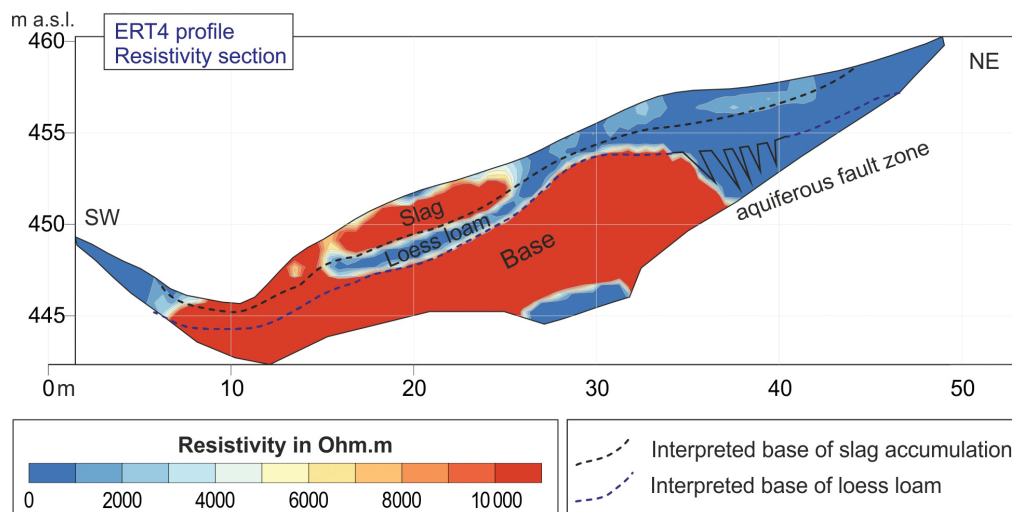
Konceptuální geofyzikální model tvoří tři kvazi homogenní geoelektrické vrstvy s různými rozsahy hodnot měrných elektrických odporů: strusková halda, kvartérní sedimenty a podložní vápence. Tomuto modelu relativně odpovídala interpretace odporového měření (obr. 3).

Morfologie protisvahu nepokrytého struskou ukazuje stupňovitý reliéf se dvěma výraznými terénními stupni. Za předpokladu rovnoměrné eroze údolí na obou stranách by se tyto terénní terasy měly vyskytovat i na zájmovém,



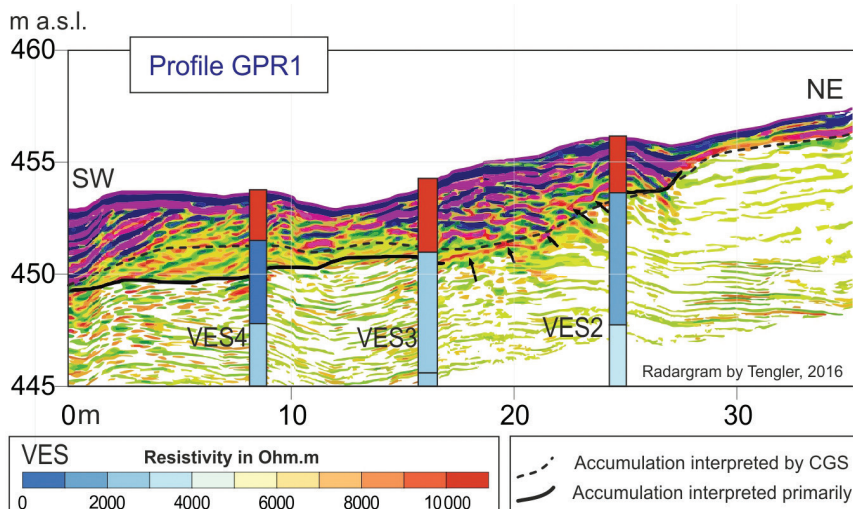
Obr. 2. Grafické zobrazení mocnosti a rozsahu struskové deponie. Topografie a morfometrie povrchu terénu lokality. Rozložení geofyzikálních prací v ploše tělesa strusky (7x ERT a 4x GPR profily, 5x sondy VES a 5x kopané sondy).

Fig. 2. Graphic depiction of the thickness and areal extent of the slag accumulation, its topography and morphometry. Distribution and position of geophysical measurements in slag body (7x ERT, 4x GPR and 5x VES profiles, and 5 dug pits).



Obr. 3. Profil ERT4, měřený se vzdáleností elektrod 1 m, ukazuje až 3 m mocnou svrchní anizotropní vrstvu se zvýšenými odpory, představující akumulaci struskového materiálu. Bázi této vrstvy označuje černá čára. Podklad strusky tvoří vrstva zvodnělých sprašových hlín a kvarterních jílů, které jeví nízké odpory (modrá čára ukazuje bázi sprašových hlín). Podloží těchto vrstev tvoří vápence vykazující vysoké odpory. Nízkoodporová anomálie v metrži 35–40 představuje zvodnělou poruchovou zónu vyplněnou kvarterními sedimenty.

Fig. 3. ERT4 profile measured with the electrode distance of 1 m indicates an anisotropic max. 3 m thick layer with increased resistances representing an accumulation of slag material. Its base is depicted by black line. The slag base is formed by a layer of water-bearing loess loams and Quaternary clays exhibiting a significantly higher resistance homogeneity and generally low resistances (the blue line shows loess loam base). The bases of these layers consist of limestones revealing high resistance. A low-resistance anomaly at a depth of 35–40 meters represents an aquiferous fault zone filled with Quaternary sediments.



Obr. 4. Interpretovaný profil GPR1, měřený georadarem Loza 150 MHz, převzatý z Tenglera (2016) a zkombinovaný s interpretací VES křivek. Černá plná čára označuje interpretovanou bázi strusky v původní zprávě. Černá přerušovaná čára označuje reinterpretaci tohoto rozhraní ČGS.

Fig. 4. The GPR1 profile measured by Loza 150MHz georadar taken from Tengler (2016), and interpreted in combination with VES resistivity curves. The black solid line indicates base of the accumulation primarily interpreted and given in the original report. The black dashed line shows a reinterpretation of this interface by the Czech Geological Survey (CGS).

struskou překrytém svahu, což geofyzikální měření částečně potvrzuje. Interpretace metod ERT, VES a GPR v kombinaci s terénním mapováním a kopanými sondami stanovila rozsah a mocnost antropogenního odvalu strusky (viz obr. 3 a 4). Maximální interpretovaná mocnost je lokálně 5,2 m, avšak nejčastěji se průměrná mocnost pohybuje mezi 1–3 m (Baldík – Dostalík 2019). Tato data tvoří jeden ze vstupů pro výpočet objemu struskového tělesa.

## Stanovení objemu struskové akumulace

Geofyzikální výsledky mohou sloužit jako podklad pro numerický odhad objemu struskového tělesa, a vstupují do něj také další parametry. Obecně podobné výpočty zásadně ovlivňuje jak kvalita vstupních dat, která se získají po zpracování výsledků terénních měření a jejich dokumentace, tak i kvantita a rozmístění v prostoru studovaného území.

Objektem stanovení kubatury je materiál struskové depozice bez rozlišení, zda jde o antropický substrát, tj. pouhé navrstvení antropogenního materiálu, nebo o antropozem, tj. půdu z antropogenních materiálů uměle vytvářenou. Proces zvětrávání strusky je extrémně pomalý a půdní diagnostický horizont v antropozemích prakticky chybí. Na lokalitě nacházíme jak vrstvy čisté nezpěvněné strusky, tak strusku promísenou s přemístěným půdním materiálem nebo tímto materiálem překrytou, popř. při okrajích deponie půdy s variabilní příměsí strusky v povrchových vrstvách.

Předpokladem pro výpočet celkového objemu materiálu jsou teoreticky znalosti tvaru povrchu terénu, a to jak v současnosti, tak v době před jeho ukládáním (před rokem 1746).

K analýze aktuálního povrchu terénu byl použit digitální model terénu (dále jen DMT). Pro jeho vytvoření byla použita data ČÚZK – Digitální model reliéfu České re-

publiky 5. generace (DMR 5G). Pro zkoumané území byl z těchto dat vygenerován grid DMT s horizontálním rozlišením 0,5 m a odvozeny další pomocné GIS vrstvy. Tento podklad umožnil mj. výpočet některých morfometrických hodnot (tab.1).

Tabulka 1. Morfometrické charakteristiky areálu strusky.  
Table 1. Morphometric parameters of the slag body.

minimum elevation	429.1 m a.s.l.
maximum elevation	459.1 m a.s.l.
mean elevation	449.3 m a.s.l.
areal extent (2D surface)	7216.0 m <sup>2</sup>
areal extent (3D surface)	7905.4 m <sup>2</sup>
minimum inclination	0.4°
maximum inclination	53.2°
mean inclination	40.9°

a.s.l. – above sea level

Povrch terénu před uložením strusky byl nepřímo odvozen metodou výpočtu na základě interpolace hodnot v síti bodů, ve kterých byla stanovena mocnost struskového pokryvu. Zdrojem dat byla kombinace vlastního terénního výzkumu lokality, především geofyzikálních technik a pedologické sondáže (Baldík et al. 2018), s cílem stanovit mocnost vrstvy akumulace a její plošný rozsah.

Hlavním zdrojem informací o území byl vlastní GF průzkum (viz výše). Pro účely výpočtu byly vybrány profily ERT1, ERT2, ERT4, ERT5, ERT7. Dále profily GPR1, GPR2, GPR3, GPR4, převzaté ze studie Tenglera (2016). Převodem interpretovaných hodnot mocnosti z analogo-

vých grafů GF měření ERT a GPR do prostředí GIS byly vytvořeny soubory bodů se stanovenou hodnotou hloubky v 9 liniích měřených profilů s horizontálním krokem 1–2 m. Celkově bylo v rámci vymapované plochy struskového tělesa připraveno k použití více než 230 bodů s určenými hodnotami (obr. 2).

Interpolací hodnot mocnosti do plochy vymezeného areálu pomocí algoritmu spline, testováním a selekcí v souborech vstupních dat a parametrů interpolačních algoritmů bylo dosaženo 5 variant výstupů (V1-5). Z hlediska prostorového rozložení hodnot i jejich celkového rozpětí a menšího počtu pixelů s vypočítanou zápornou hodnotou mocnosti pak z analýz nejlépe vychází varianta V4. Výsledek je zachycen na obr. 2 a 5.

Ze vstupního rastru DMT byly odečteny od hodnot Z (nadmořské výšky) hodnoty mocnosti z rastru vzniklého interpolací pro každou z 5 variant zvlášť a nástrojem, který vypočítává změny ploch a objemů mezi dvěma povrchy, byl „odečten“ rastr porovnán se vstupním DMT opět pro 5 variant (tab. 2).

Pro porovnání byl ještě otestován alternativní postup výpočtu, který spočíval v modifikaci bodového výškopisného pole (LIDAR 5G) odečtením nadmořských výšek podle výsledku spline interpolace ve variantě V4. Z těchto upravených vektorových dat byl vygenerován nový DMT a ten následně porovnán s výchozím DMT. Tímto postupem vychází objem na 13 796 m<sup>3</sup>, tj. 92% z průměru hodnot V1–5.

Ze vstupních údajů o mocnostech vrstvy struskové depozice byl vypočítán její celkový objem v rozsahu 14 až

Tabulka 2: Výsledné hodnoty objemu v m<sup>3</sup> pro 5 variant interpolace v závislosti na parametru interpolačních algoritmů.

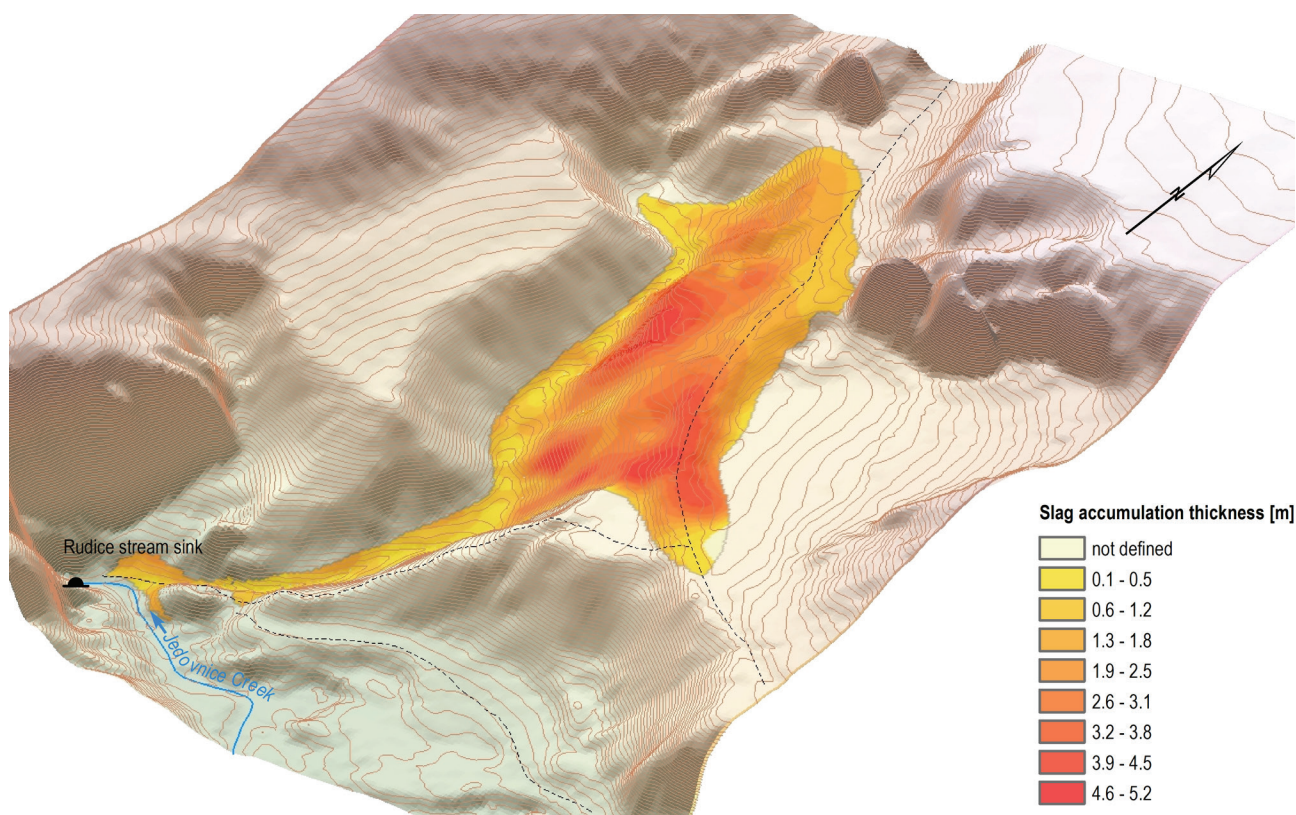
Table 2: Resulting values for the volume in m<sup>3</sup>, 5 interpolation variants depending on the parameter of interpolation algorithms.

variant	volume [m <sup>3</sup> ]	average V1–V5
V1	15 199	
V2	15 113	
V3	15 059	14 995 m <sup>3</sup>
V4	14 863	
V5	14 741	

15 tis. m<sup>3</sup> na zkoumané lokalitě v ploše (2D) cca 7200 m<sup>2</sup>, resp. cca 7900 m<sup>2</sup> na 3D povrchu, a její hmotnost byla odhadnuta na cca 15 000 tun, s využitím objemové hmotnosti netříděné, neuhněné a volně sypané strusky cca 1000 kg/m<sup>3</sup>.

## Diskuze a závěry

Na základě výsledků geofyzikálních měření metodami ERT, VES a GPR v kombinaci s terénním mapováním a pedologickými sondami byl proveden nový odhad rozsahu a mocnosti antropogenního odvalu strusky. Jeho vznik souvisí s výrobou železa v Hugově huti.



Obr. 5. Výsledek interpolace měřených hodnot mocnosti strusky.

Fig. 5. The result of interpolation of the measured slag accumulation thickness values.

Maximální interpretovaná mocnost struskového materiálu je lokálně 5,2 m, avšak nejčastěji se průměrná mocnost pohybuje mezi 1–3 m. Struskou pokrytý svah před ponorem Jedovnického potoka je primárním zdrojem zanášení jeskynního systému Rudické propadání – Býčí skála.

Pohyb struskového materiálu eskaluje srážková voda, která v mezivrstevním prostoru zvyšuje pórový tlak a snižuje efektivní pevnost. Dochází také k nadlehčování vlivem vztlaku a relativně nízké specifické hmotnosti strusky, což zvyšuje náchylnost strusky k erozi a svahovým pohybům.

Výzkum lokality definitivně vyloučil možnost odtěžení v plném rozsahu, protože obrovská kubatura struskového materiálu přesahuje ekonomické a technické možnosti zodpovědných správních subjektů. Situaci na lokalitě je nutno řešit zastavením transportu strusky a udržením depozice na místě uložení. Stávající pokusy o řešení pomocí dřevěných záchytných stupňů jsou sice efektivní, avšak jen dočasné. Dlouhodobým a v podstatě definitivním sanačním opatřením je přehrazení údolí kamennými rovnánkami a volně sypaným, nerovnaným balvanitým záhozem v přesně definovaném místě, s použitím místních vápencových balvanů. Takové řešení navíc nenaruší přírodní ráz NPP Rudické propadání.

*Poděkování. Autoři děkují recenzentům Mgr. Radku Klanicovi, Ph.D., a RNDr. Petru Táboříkovi, Ph.D., za kritické pročtení rukopisu. Práce byla vypracována s finanční podporou projektu OG MŽP a ČGS 386700.*

## Literatura

- BALDÍK, V. – DOSTALÍK, M. (2019): Zhodnocení negativního vlivu struskové deponie na jeskynní systém Rudické propadání – Býčí skála. In: Zborník konferencie: Medzinárodná konferencia ZNEČISTENÉ ÚZEMIA 2019, 146–148. – Slovenská agentúra životného prostredia. Piešťany. Dostupné z: <http://contaminated-sites.sazp.sk/node/86>.
- BALDÍK, V. – KRUMLOVÁ, H. – BURIÁNEK, D. – KRYŠTOFOVÁ, E. – JANDERKOVÁ, J. – SEDLÁČEK, J. – NOVOTNÝ, R. – DOSTALÍK, M. (2018): Mobilizace chemických složek struskové deponie v Národní přírodní rezervaci Rudické propadání. – Geol. Výzk. Mor. Slez. v Roce 2017, 25, 1–2, 108–112. Dostupné z: <https://doi.org/10.5817/GVMS2018-1-2-108>.
- FLORSCH, N. – LLUBES, M. – TÉREYGEOL, F. (2012): Induced polarization 3D tomography of an archaeological direct reduction slag heap. – Near Surf. Geophys. 10, 6. Dostupné z: <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2012042>.
- Geoportál ČÚZK. Prohlížeč služba WMS – ZABAGED [online]. Dostupné z: [https://geoportal.cuzk.cz/\(S\(220ycg250gpn5pav2lumpzm\)\)/Default.aspx?menu=3113&mode=TextMeta&side=wms.verejne&metadataID=CZ-CUZK-WMS-ZABAGED-P&metadataXSL=metadata.sluzba](https://geoportal.cuzk.cz/(S(220ycg250gpn5pav2lumpzm))/Default.aspx?menu=3113&mode=TextMeta&side=wms.verejne&metadataID=CZ-CUZK-WMS-ZABAGED-P&metadataXSL=metadata.sluzba).
- HOŘEJŠÍ, J. – ŠAFKA, J. (1987): Technický průvodce. Statické tabulky 51. – SNTL. Praha.
- CHAMBERS, J. E. – WILKINSON, P. B. – WELLER, A. – MELDRUM, P. I. – KURAS, O. – OGILVY, R. D. – AUMONIER, J. – BAILEY, E. – GRIFFITHS, N. – MATTHEWS, B. – PENN, S. – WARDROP, D. (2012): Characterising sand and gravel deposits using electrical resistivity tomography (ERT): case histories from England and Wales. In: WALTON, G. – HUNGER, E., ed.: Proceedings of the 16th Extractive Industry Geology Conference, held at the University of Portsmouth 8th to 11th September 2010. Extractive Industry Geology Conference, 166–172.
- JIRÁSEK, J. – VAVRO, M. (2007): Nerostné suroviny a jejich využití. Výroba železa a oceli. – VŠB – Techn. univ. Ostrava [online]. Dostupné z: [http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/vyroba\\_zeleza.html](http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/vyroba_zeleza.html).
- MAREŠ, S. – GRUNTORÁD, J. – HRÁCH, S. – KAROUS, M. – MAREK, F. – MATOLÍN, M. – SKOPEC, J. (1990): Úvod do užití geofyziky. – SNTL – Nakl. tech. lit. Praha.
- NEMČOK, A. – PAŠEK, J. – RYBÁŘ, J. (1974): Dělení svahových pohybů. – Sbor. geol. Věd, Hydrogeol. inž. Geol. 11, 77–93.
- OTAVA, J., ed. – BALÁK, I. – BALDÍK, V. – BUBÍK, M. – BURIÁNEK, D. – ČÁP, P. – ČERNÝ, J. – FRANCŮ, J. – FŮRYCHOVÁ, P. – GILÍKOVÁ, H. – HAVLÍN, A. – HLADIL, J. – JANDERKOVÁ, J. – KOCIÁNOVÁ, L. – KOLEJKA, V. – KONEČNÝ, F. – KRYŠTOFOVÁ, E. – KUMPAN, T. – MELICHAR, R. – MÜLLER, P. – PALEČEK, M. – PECINA, V. – PECKA, T. – SEDLÁČEK, J. – SEDLÁČKOVÁ, I. – ŠRÁMEK, J. – TOMANOVÁ PETROVÁ, P. – VEČEŘA, J. – VÍT, J. (2013): Vysvětlivky k Základní geologické mapě České republiky 1 : 25 000, list 24-411 Jedovnice. – 298 s. MS Čes. geol. služba. Praha.
- Půda v mapách. Mapová aplikace. – Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v. i. [online]. Dostupné z: <https://mapy.vu-mop.cz>.
- STRÁNSKÝ, K. – STRÁNSKÝ, L. (2007): Zaniklá Hugova huť v Jedovnicích. – Slévárství 55, 5–6, 289–294.
- ŠTĚPÁNEK, J. (2013): Hugova huť. – Portál Hrady.cz [online]. Dostupné z: <https://www.hrady.cz/index.php?OID=11285>.
- TENGLER, R. (2016): Závěrečný zpráva, Rudice – orientační měření skládky, georadarový průzkum. – MS Správa CHKO Moravský kras. Blansko.
- ULLRICH, B. – WELLER, A. – GÜNTHER, T. – RÜCKER, C. (2009): Geophysical Prospecting of Ancient Slag Deposits in Munigua (Spain) and Ain-al Hajer (Morocco) Using Complex Resistivity Tomography. – Selected papers of the 2nd International conference Archaeometallurgy in Europe – Aquileia (Italy) 2007.