

ANALÝZA GEODETICKÝCH MĚŘENÍ PODDOLOVANÉHO ÚZEMÍ

ANALYSIS OF GEODETIC MEASUREMENTS OF THE UNDERMINED AREA

Hana Doležalová¹, Vlastimil Kajzar², Kamil Souček³, Lubomír Staš⁴

Abstrakt

Hlubinná těžba uhelných ložisek v ostravsko-karvinském revíru způsobuje pohyby a deformace na povrchu. Nejběžnějším způsobem sledování povrchových projevů poddolování jsou výšková geodetická měření metodou geometrické nivelace. Při opakovaném použití metody GNSS však získáme prostorové souřadnice sledovaných bodů, a tím tedy nejen výškové změny na povrchu poddolovaného území, ale i horizontální posuny, případně vektor celkového pohybu. Pokud dále využijeme metodu letecké fotogrammetrie, můžeme vytvořit digitální model celé sledované oblasti. Přesnost fotogrammetrie je však obecně nižší. Každá z geodetických metod má tak své výhody i nevýhody a volba vhodné metody pro měření na poddolovaném území závisí především na účelu měření a na konkrétních podmínkách v dané lokalitě. Měření provedená na pozorovací stanici nad dobývanými poruby v blízkosti Karviné ukázala na možnosti použití metod GNSS a letecké fotogrammetrie pro komplexnější pochopení vývoje poklesové kotliny.

Abstract

Underground mining of coal deposits in Ostrava-Karviná region causes movements and deformations on the surface. The most common way to observe the surface effects of undermining is using geodetic surveying by levelling. But repeated surveying by GNSS provides spatial coordinates of observed points, which means not only vertical changes on the surface of the undermined area, but also horizontal movements, and/or vector of spatial movement. But the accuracy of photogrammetry is generally lower. Each geodetic method has its advantages and disadvantages, and the choice of proper method for surveying on the undermined area depends mainly on the purpose of surveying and on specific conditions in given locality. Measurements that were done in an observation network above exploited mining panels near Karviná showed the possibilities of GNSS and aerial photogrammetry for the more complex understanding of the subsidence depression development.

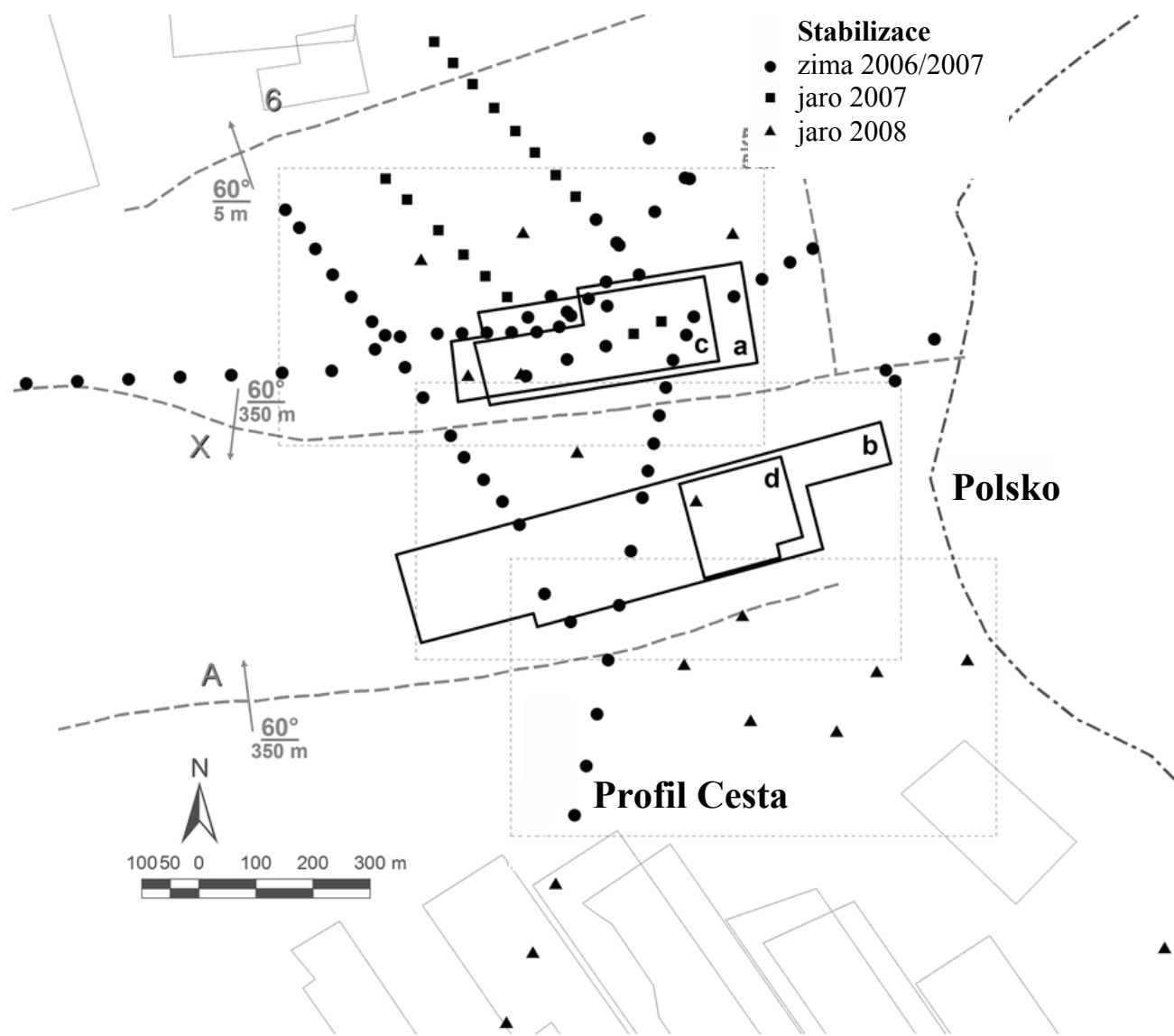
Klíčová slova

poddolování, GNSS, letecká fotogrammetrie

1 Úvod

Vlivem hlubinného dobývání uhelných ložisek dochází na povrchu ostravsko-karvinského revíru k výrazným změnám. Jde nejen o povrchové pohyby a deformace způsobené prohnutím, či zavalením nadložních hornin do vyrubaných prostor, ale také o změny

způsobené rozsáhlou rekultivační činností. Geodetické metody jsou nejčastějším prostředkem pro sledování vlivů poddolování na povrchu. Volbou vhodné metody lze zjišťovat polohový, výškový nebo prostorový stav terénu s odpovídající přesností. Zatímco jednotlivým geodetickým zaměřením zjistíme stav povrchu v určité době (v určité fázi ovlivnění těžbou), opakovaním geodetických měření je možno sledovat změny povrchu a průběh vývoje poklesové kotliny. V místech aktivní rekultivace však není možné stabilizovat a opakovaně zaměřovat body běžnými pozemními geodetickými měřeními, proto je třeba zahrnout do komplexního monitoringu poddolovaného území také další metody.



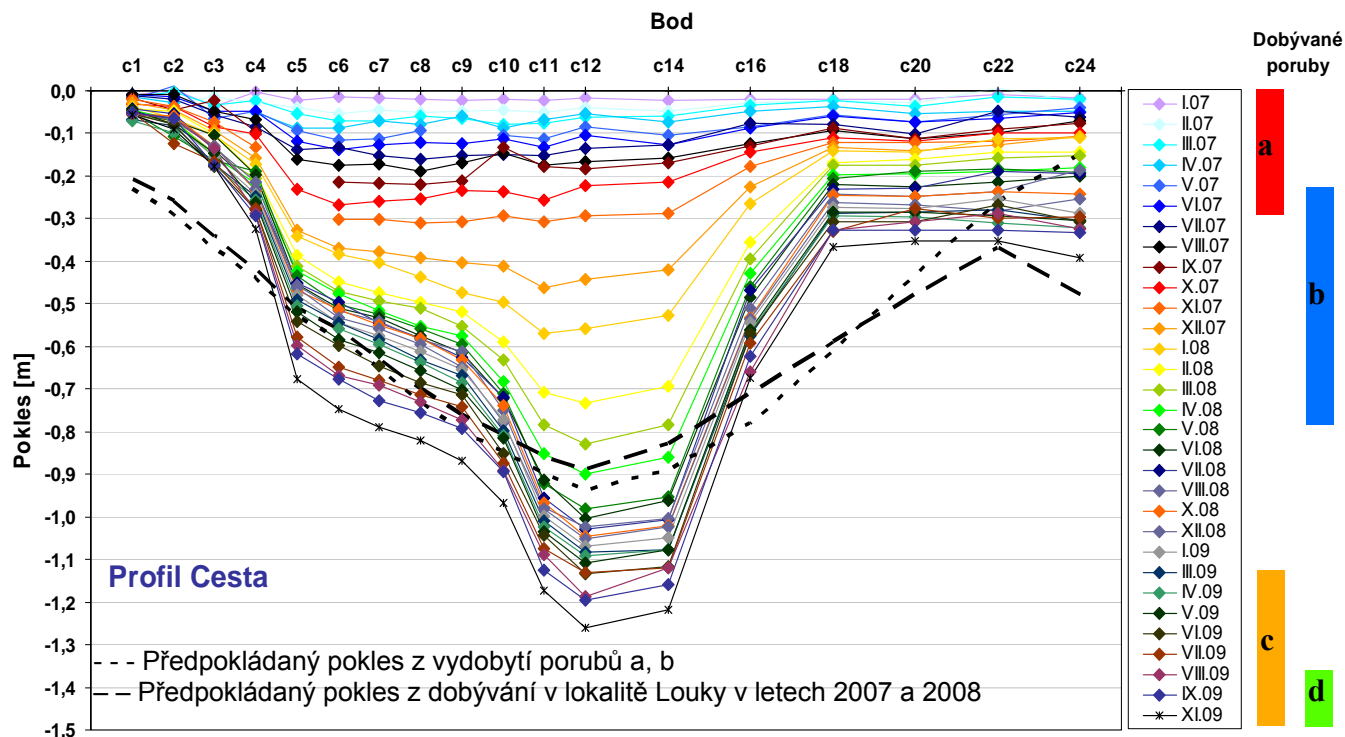
2 Zájmová oblast

Zájmovou oblastí je lokalita Louky v hornoslezské uhelné pánvi v severní části důlního pole Dolu ČSM-sever na demarkaci s Dolem Darkov, na východě ohraničená státní hranicí s Polskem. Horninový masív je v dané lokalitě tvořen typickými horninami karbonského pohoří v hornoslezské pánvi s tafrogenní stavbou. Kostru tafrogenní stavby tvoří základní poklesy s amplitudou většinou desítek až stovek metrů, kombinované horizontálními posuny (Dopita 1997). Horninový masív je porušen několika výraznými tektonickými poruchami poklesového charakteru (viz obr. 1).

V 90. letech probíhala v zájmové oblasti exploatace několika porubů s mocností od 1,3 do 2,5 m, v hloubce od 780 m do 950 m. Vliv dobývání těchto porubů na povrch byl sledován opakovaným nivelačním měřením, které ukázalo, že největší pokles nastal do roku 1999 (až 70 cm).

Následovalo postupné uklidňování povrchových

Obr. 1 Body pozorovací stanice, tektonické poruchy a dobývané poruby



Obr. 2 Vývoj poklesů bodů na profilu Cesta a předpokládané poklesy (Doležalová et al. 2010)

3 GNSS měření

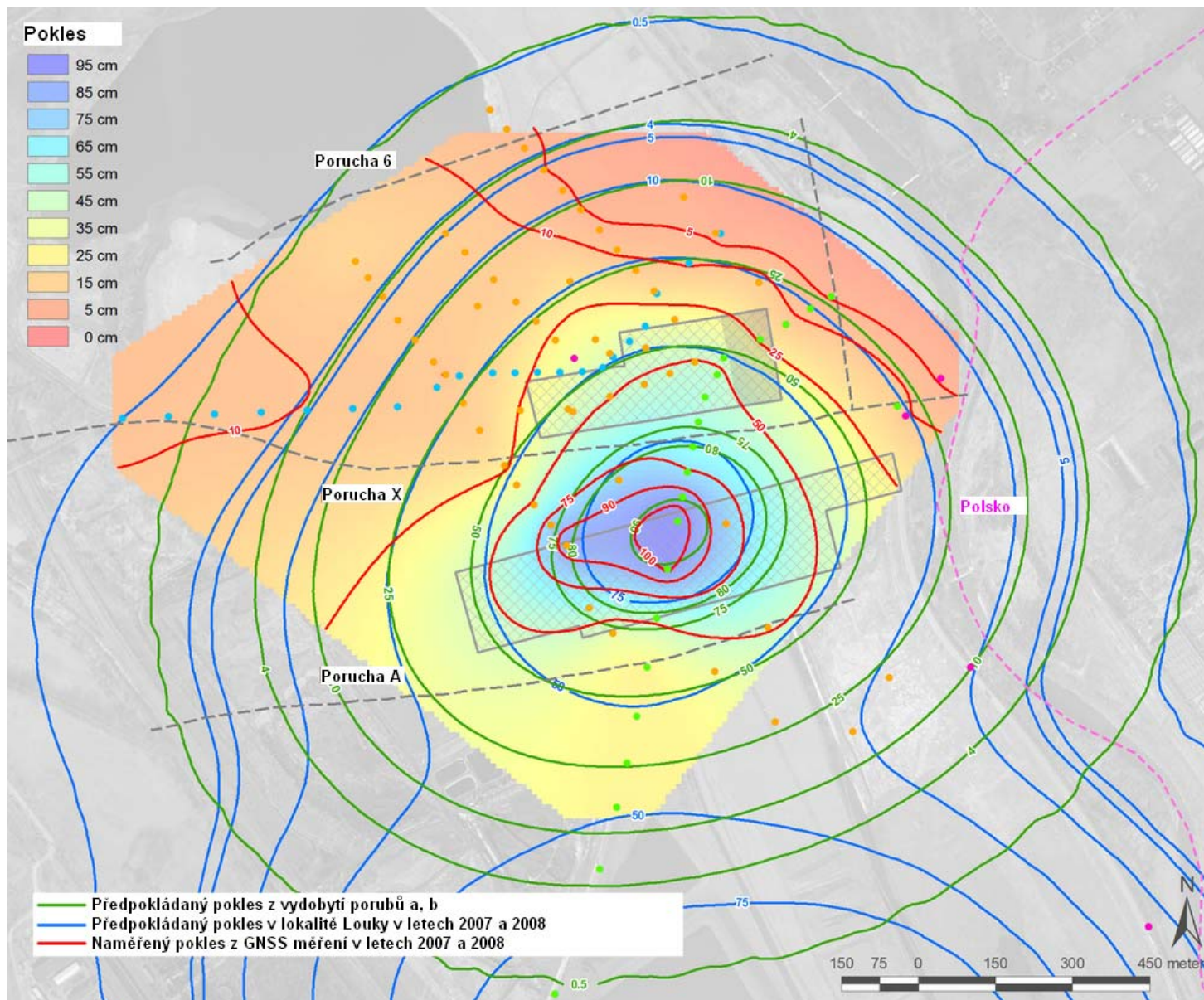
Hlavní metodou zaměřování stabilizovaných bodů byla metoda GNSS. Body byly zaměřovány pomocí dvou GNSS souprav firmy Leica, GPS Systém 1200, a to staticky s dobou observace alespoň 10 minut na každém bodě. Referenční stanice byla během měření umístěna na trigonometrickém bodě č. 4 ZBPB v Karviné, mimo předpokládané vlivy dobývání. Měření se opakovala po cca 5 týdnech. Výsledkem každého GNSS měření a následného zpracování byly prostorové souřadnice zaměřovaných bodů. Díky tomu lze vyhodnocovat nejen poklesy (bodově, v profilech a plošně), ale i horizontální posuny jednotlivých bodů, případně deformace jednotlivých úseků (Doležalová 2009, Doležalová 2010).

Na obrázku 2 je zobrazen vývoj poklesů bodů profilu Cesta (lokality na obr. 1). Tento profil prochází od východu na jih nad dobývanými poruby a nejvýraznějšími tektonickými poruchami X a A. Z vyhodnocení poklesů bodů na tomto profilu je tak vliv tektonických poruch dobře patrný, především v jižní polovině profilu, tedy nad poruchou A. Je zde zřejmý složitější vývoj poklesové

projevů poddolování a v roce 2004 vykazoval povrch již jen mírné doznívání poklesů v rozsahu do cca 5 cm za rok (Doležalová et al. 2007). Další těžba v zájmové oblasti započala koncem roku 2006. Postupně byly vytěženy další 4 poruby s mocností od 1,4 do 3,2 m v hloubce od 950 m do 1040 m, a to stěnováním na řízený zával, s postupem od východu na západ.

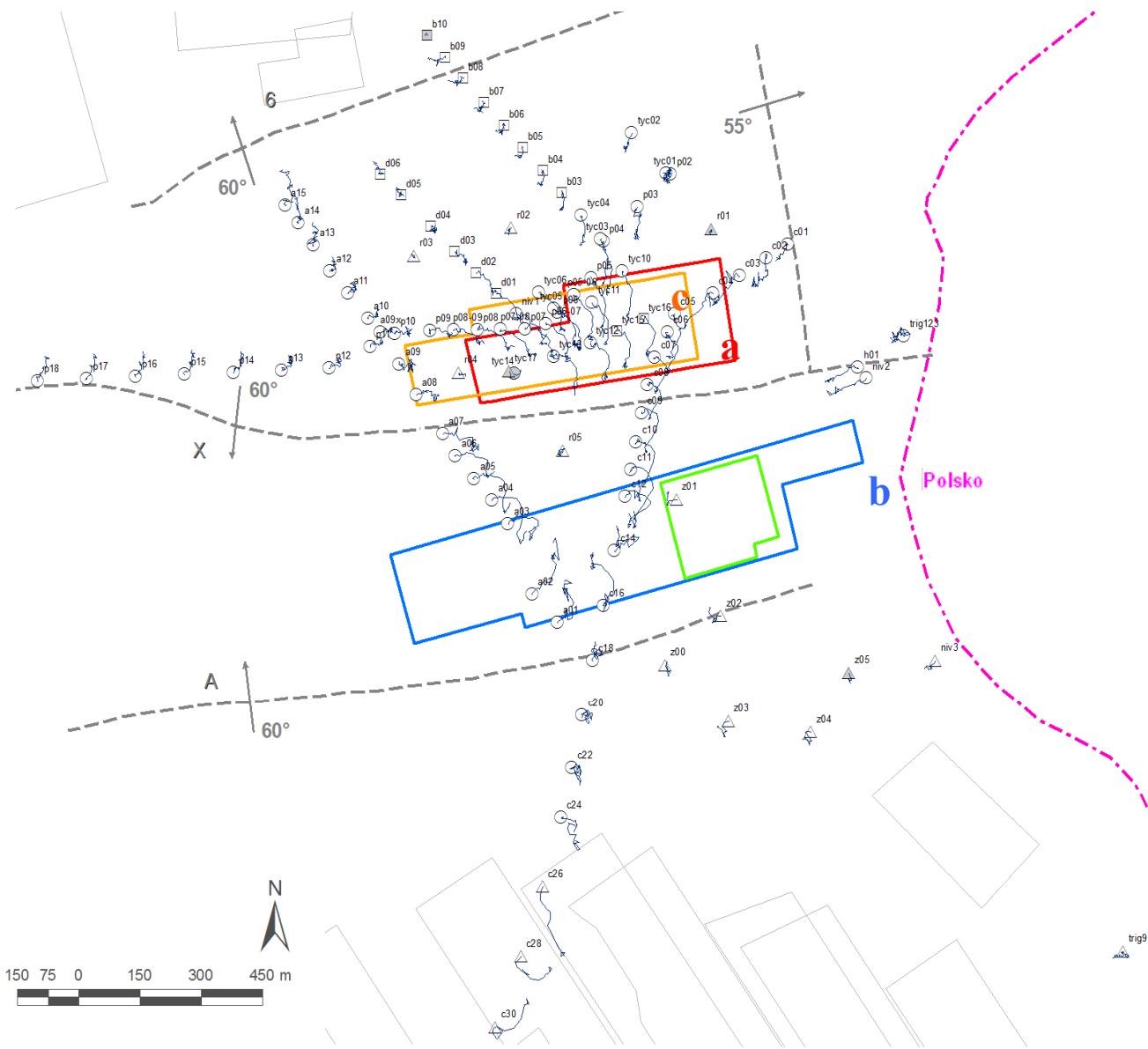
Pro povrchová geodetická měření byla v zájmové lokalitě budována pozorovací stanice jako soubor stabilizovaných bodů na povrchu a na objektech. Stabilizace bodů byla přizpůsobena podmínkám povrchu v dané lokalitě, a to především s ohledem na potřeby geodetického měření a také probíhající rekultivační práce. Většina bodů byla stabilizována v liniích a lomených přímkách, další roztroušeně tam, kde bylo potřeba pozorovací stanice zahustit. Celkem bylo opakovaně zaměřováno více než 100 bodů.

kotliny, křivky poklesů jsou nepravidelné. Mezi body c14 a c18, vzdálenými od sebe cca 200 m, je rozdíl v poklesu více než 80 cm. Bod c18 a další body jižně od něj pak vykazují téměř shodný, pravidelný pokles do 40 cm. Oproti modelům předpokládaných poklesů v dané



Obr. 3 Plošné vyhodnocení naměřených poklesů z GNSS dat a předpokládané poklesy (Doležalová et al. 2009)

oblasti je tedy vývoj poklesové kotliny značně nepravidelný. Příčinou je zde celková geomechanická situace, tedy především vliv tektonických poruch X a A a vliv dřívější hlubinné těžby v nadloží sledovaných porubů (Doležalová et al. 2010). Pokud je síť stabilizovaných bodů dostatečně hustá, je tedy dokonce možné z GNSS měření vyhodnocovat povrchové projevy poddolování také formou plošných modelů poklesů. Na obrázku 3 je zobrazeno plošné vyhodnocení vývoje poklesové kotliny na základě GNSS měření v letech 2007 a 2008, tedy v době, pro kterou jsou k dispozici rovněž také modely předpokládaných poklesů v zájmové oblasti (zelené a modré izoliny na obr. 3, modely těžební společnosti vytvořeny metodou Budryk-Knothe). Z porovnání předpokládaných modelů s plošným modelem vytvořeným ze skutečně naměřených poklesů v dané lokalitě je patrné, že mezi nimi nedochází k úplné shodě. V místě, kde nebylo možno stabilizovat body v dostatečné hustotě (jihozápadní část poklesové kotliny), sice může být plošný model poklesové kotliny z hod-



Obr. 4 Horizontální posuny bodů (Kajzar 2010)

obecný pohyb je tvořen dvěma složkami: pohybem svislým – poklesem – a pohybem vodorovným – posunem. Na obrázku 4 jsou zobrazeny horizontální posuny bodů pozorovací stanice (Kajzar 2010). Z obrázku je zřejmé, že body v severozápadní části dané lokality nesměřují k dobývaným porubům v jejím středu. Tyto body směřují na severozápad a nejsou tedy primárně ovlivněny těžbou sledovaných

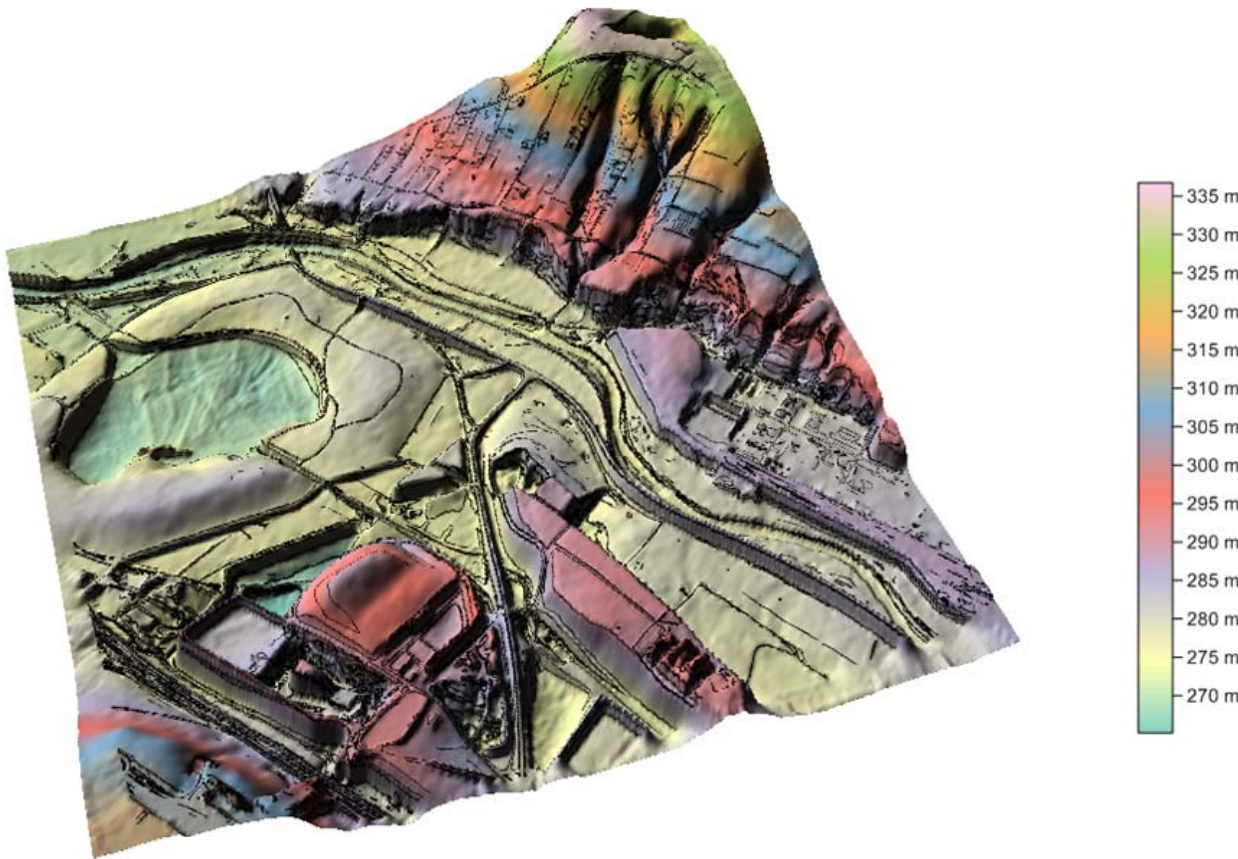
not naměřených pomocí GNSS mírně zkreslený, ale přesto lze pro většinu zájmové oblasti konstatovat, že červené izolinie skutečných poklesů tvarově neodpovídají oválným izoliniím předpokládaných poklesů a rozložení velikosti naměřených poklesů se liší od předpokládaných hodnot. V blízkosti středu poklesové kotliny skutečné poklesy sledovaných bodů přesahují předpokládané hodnoty. Také v severozápadní části poklesové kotliny jsou i za předpokládanou hranici dotčení (4 cm) naměřeny poklesy větší (okolo 10 cm) než podle modelu předpokládaných hodnot.

Naopak v severovýchodní části poklesové kotliny jsou skutečné poklesy výrazně menší oproti předpokladům, jež v této oblasti počítaly s poklesy téměř 25 cm. A to, že se tyto nesrovnalosti netýkají pouze ojedinělých bodů, ale vždy skupin bodů v určité části území, svědčí o tom, že se nejedná o náhodný jev, ale o projev složité geomechanické situace, zejména blízkých tektonických struktur (Doležalová et al. 2009).

Závěry učiněné z GNSS měření na základě vyhodnocení poklesů pak byly upřesněny vyhodnocením horizontálních posunů bodů. Pouze sledováním směru pohybu bodu totiž zjistíme jeho primární ovlivnění. Pohyb bodu na povrchu poddolovaného území je totiž pohybem obecným, směřujícím k těžišti vyrubané plochy. Tento

porubů, ale ovlivňují je především procesy na severozápadě, v širším okolí lokality Louky. Analýza horizontálních posunů v jižní části sledované oblasti také přispěla k pochopení dějů v místech výrazných povrchových změn, na které ukázalo profilové vyhodnocení poklesů. Z grafické analýzy horizontálních posunů vyplývá, že body půdorysně oddělené od sledovaných porubů *b* a *d* linií, odpovídající přibližně průběhu zobrazené tektonické poruchy A, nevykazují výrazné ovlivnění polohy ze strany těchto porubů a zdá se, že výsledná trajektorie jednotlivých křivek posunů bodů je zcela určována vlivem dobývání působících od jihu. Na sever od sledovaných porubů *b* a *d* jsou jimi ovlivněny body do značné vzdálenosti, na rozdíl od vývoje na jihu. Ze zjištěných výsledků lze usuzovat, že tektonická porucha A tvoří bariéru rozdělující celou sledovanou oblast na dva samostatné celky (Doležalová et al. 2010).

4 Letecká fotogrammetrie

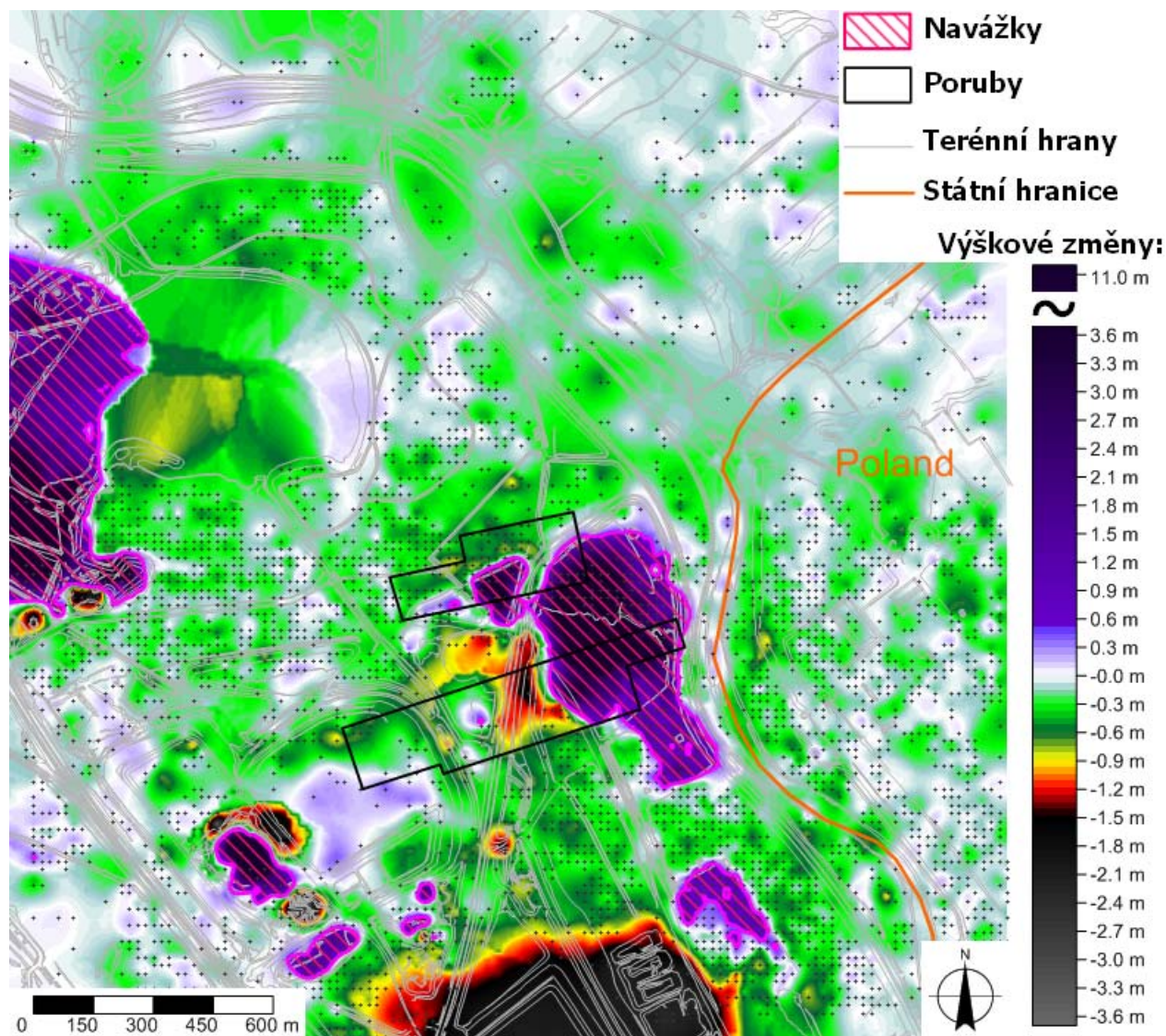


Obr. 5 Digitální model terénu z dat letecké fotogrammetrie

Vedle GNSS je fotogrammetrie další metodou, která umožňuje určování prostorové polohy bodu a při opakovaném použití na stejném území může tedy určit pohyb bodu, resp. změnu jeho polohy. Narozdíl od GNSS, kde se postupuje bod po bodu, lze použitím fotogrammetrie zachytit najednou větší oblast, přesnost se zde ale snižuje se vzdáleností kamery od sledovaného objektu. Letecká fotogrammetrie, kdy je měřická komora nesena letadlem nebo jiným nosičem, nabízí sledování poklesové kotliny v celém jejím rozsahu s konzistentní přesností, neboť výška letu je přibližně konstantní. Pro sledování změn v poklesové kotlině se však vzhledem k obecně nižší přesnosti této metody doporučuje její použití v těch poddolovaných oblastech, kde se předpokládají změny v řádu desítek centimetrů. Letecká fotogrammetrie se pak primárně nevyužívá pro sledování změn v poloze jednotlivých bodů, ale pro sledování větších změn poklesové kotliny jako celku.

Ve sledované lokalitě byla jako primární metoda sledování povrchových projevů poddolování zvolena metoda GNSS. Tato metoda tak poskytla údaje o změnách jednotlivých bodů pozorovací

stanice. Model celé poklesové kotliny, vytvořený z těchto dat, však může být v některých částech zkreslen vinou nepravidelnosti sítě bodů a absencí bodů v místech aktivní rekultivace povrchu. Proto byla vybrána letecká fotogrammetrie jako další observační metoda. Tato metoda umožňuje sledovat celou poklesovou kotlinu a její přímé okolí, včetně oblastí zavážených v důsledku rekultivace.



Obr. 6 Vertikální změny mezi 2007 a 2009 z letecké fotogrammetrie (Kajzar et al. 2011)

Letecké snímkování v dané lokalitě včetně základního vyhodnocení dat v síti 20x20 m bylo provedeno firmou ARGUS GEO SYSTEM s.r.o. jednou ročně v letech 2007 až 2009. Letecké snímkování bylo provedeno vždy na jaře každého roku po roztátí sněhu, ale před nárůstem vegetace. Byla snímána oblast cca 2x2 km. První letecké snímkování bylo provedeno analogovou kamerou, další snímkování byla provedena novou digitální kamerou. Výsledkem byla sada prostorových souřadnic několika tisíc bodů v mřížce 20x20 m, výrazné terénní hrany a ortofotomapa celé oblasti. Tato data byla připravena k vyhodnocení, porovnávání a tvorbě digitálního modelu terénu. Digitální model terénu (obr. 5) s prostorovým rozlišením 10 m dobře ukazuje tvar celé sledované oblasti i jejího okolí. Vedle prostorových modelů lze pro každý rok snímkování připravit i plošný model a z nich pak rozdílové modely terénu, tedy modely povrchových změn za dané období mezi snímkováním v jednotlivých letech. Na obr. 6 je zobrazen rozdílový model sledované oblasti mezi prvním a posledním snímkováním, tj. za období jaro 2007 až jaro 2009. Na tomto modelu lze vysledovat dynamiku změn v celé oblasti: navážky, velké poklesy v nadloží porubů, ale i menší poklesy v téměř celé oblasti. Projevy probíhající rekultivace (navážení hlušiny) jsou zjevné především v centrální a ve východní části. Hlušina zde byla navezena až do

výšky 11 m. Tyto změny bylo možné sledovat opakovanou rekognoskací terénu. Vinou nemožnosti stabilizovat body v zavážených oblastech však nebylo možné provádět pozemní geodetická měření a kvantitativních zjištění změn tak umožnila až metoda letecké fotogrammetrie. Poklesy zjištěné touto metodou v oblasti stabilizované bodové pozorovací stanice korespondují s našimi výsledky z GNSS měření. Zaznamenán byl i výrazný pokles v jižní části snímané oblasti, kde je již významný vliv těžebních aktivit působících z jihu. Na severozápadě je pak vidět poklesy vztažené k aktivitám sousedícího Dolu Darkov (*Kajzar et al. 2011*).

5 Další metody

Radarová interferometrie je další metodou, jež může poskytnout výstup v podobě digitálního modelu terénu. Vstupní data se však nezískávají snímáním z letadla, jak je tomu u letecké fotogrammetrie, ale jsou pořizována z družic (radarů). Zpracovávají se pak páry družicových snímků daného území a na jejich základě se vyhodnocuje buď digitální model terénu, nebo model deformací. Radarová (družicová) interferometrie (InSAR) totiž v sobě skrývá nejen technologii tvorby digitálního modelu terénu, ale i možnosti, jak měřit změny tohoto modelu v čase. Jako diferenční interferometrie (DInSAR) je tedy tato metoda další možností sledování povrchových změn, a to s přesností téměř srovnatelnou s pozemním měřením [29]. Zatímco letecká fotogrammetrie zaznamená větší změny na poddolovaném území, metoda radarové interferometrie je metodou, která je naopak schopna zaznamenat menší změny. Metoda diferenční interferometrie byla úspěšně použita pro sledování vlivů poddolování na Ostravsku, kde i po ukončení těžby ukazují výsledky vyhodnocení pro období 2003–2006 průměrný pokles více než 3 mm/rok (*Kadlečík et al. 2010*). V současné době probíhá vyhodnocování vlivů poddolování metodou DInSAR i pro lokalitu Louky, a to společně s vyhodnocením pozemních měření metodou GNSS. Ukazuje se, že metoda diferenční interferometrie může ve spojení s metodou GNSS přinést kvalitativní i kvantitativní vyhodnocení výškových změn i v oblasti Karvinska, tedy v oblasti větších změn.

Možné je také využití nejběžnějších geodetických metod, tedy výškového zaměření metodou geometrické nivelace a polohového zaměření bodů např. polygonovým pořadem. Při vhodně zvolené metodice lze u těchto měření dosáhnout vysoké přesnosti. Problematické zde však může být připojení těchto měření na bod či body mimo poddolované území. Zatímco metoda GNSS umožní připojit (vztáhnout) měření na povrchu poddolované oblasti k bodům, které leží i v několikakilometrové vzdálenosti, a i přesto, že se v případě OKR projevuje poddolování ve značné vzdálenosti, je tak možné efektivní připojení na neovlivněné území, u klasických pozemních metod měření nemusí být několikakilometrový připojovací pořad efektivní z hlediska finanční i technické náročnosti a z hlediska požadované přesnosti.

6 Závěr

Každá z geodetických metod může poskytnout určité informace o změnách v poklesové kotlině, resp. údaje o výškovém, polohovém či prostorovém stavu sledovaných povrchových bodů, případně celého povrchu poddolovaného území. Jednotlivé metody však mají nejen různý dosah, ale také různou přesnost. Je proto vhodné využít ke sledování povrchových projevů poddolování komplex metod, který by měl umožnit sledování změn v celém rozsahu poklesové kotliny i v jejím nejbližším okolí, na základě opakovaných měření různými metodami tak, aby byly změny na povrchu zjišťovány s dostatečnou přesností, adekvátní velikosti probíhajících změn. Souhrnná analýza výsledků

měření jednotlivými metodami pak umožní komplexní vyhodnocení a pochopení dějů, k nimž dochází na povrchu v důsledku hlubinné těžby.

Po optimální stabilizaci bodů pozorovací stanice je vhodné použít metodu GNSS pro sledování změn prostorové polohy jednotlivých bodů. Z prostorových souřadnic bodů z GNSS měření je pak možno zjišťovat i horizontální posuny, které přispívají ke sledování směrů pohybů jednotlivých bodů a tím k lepšímu pochopení vývoje celkového pohybu na povrchu poddolovaného území. Pokud budou body stabilizovány zhruba rovnoměrně v celé oblasti, je možno na základě plošných modelů sledovat vývoj poklesů povrchu v rozsahu celé poklesové kotliny. Tyto modely však mohou být zkráceny v místech, kde je nemožné stabilizovat body, a oblasti aktivních rekultivací tak nemusí věrohodně vystihnout.

Běžné použití metody GNSS na poddolovaném území nemusí zajistit sledování malých povrchových změn s dostatečnou přesností. Je proto potřeba oblasti s malými změnami sledovat také pomocí jiných, přesnějších metod. Nivelační měření je schopno zjistit i výškové změny v rozsahu několika milimetrů a může tak vhodně doplnit a zpřesnit GNSS měření například v okrajových částech poklesové kotliny nebo obecně v těch částech poddolovaného území, kde dochází pouze k malým povrchovým změnám.

Vzhledem k tomu, že na poddolovaném území často probíhají rekultivační práce a povrch je tak částečně zavážen důlní hlušinou, je vhodné doplnit sledování poklesové kotliny některou z metod nepřímého sběru dat, neboť v místech probíhající rekultivace není možno stabilizovat a opakovaně zaměřovat body některou z běžných geodetických metod. Součástí komplexního monitoringu by tedy mělo být i zjištění celkového tvaru poklesové kotliny ve formě digitálního modelu terénu metodou letecké fotogrammetrie. Pokud bude monitoring probíhat v oblasti s velkými změnami, lze tuto metodu uplatnit i pro zjištění změny celkového tvaru zájmové oblasti a je proto vhodné provést letecké snímkování před začátkem dobývání i po jeho ukončení. Případně by se místo letecké fotogrammetrie dala použít speciální aplikace radarové interferometrie (např. metoda DInSAR), která může být ve spojení s pozemními geodetickými měřeními vhodnou metodou ke sledování povrchových změn v rozsahu celé sledované oblasti.

Poděkování

Článek byl vypracován v rámci projektu ICT CZ.1.05/2.1.00/03.0082 (Institut čistých technologií těžby a užití energetických surovin) financovaného Evropskou unií a z prostředků státního rozpočtu prostřednictvím Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy a v rámci Výzkumného záměru Akademie věd ČR OZ 30860518.

Literatura

- DOLEŽALOVÁ H. *Analýza geodetického a geofyzikálního monitoringu poddolovaného území. Disertační práce.* Ostrava: ÚGN AV ČR, VŠB-TU Ostrava, 2009. 127 s.
- DOLEŽALOVÁ H. GNSS měření na poddolovaném území u Karviné. *EGRSE: Exploration Geophysics, Remote Sensing and Environment.* Roč. 17, č. 1 (2010), s. 9-17. ISSN 1803-1447.

- DOLEŽALOVÁ H., KAJZAR V., SOUČEK K., STAŠ L. Evaluation of mining subsidence using GPS data. *Acta geodynamica et geomaterialia*, Vol. 6, No. 3, 359-367, 2009. ISSN 1214-9705.
- DOLEŽALOVÁ H., KAJZAR V., SOUČEK K., STAŠ L. Evaluation of vertical and horizontal movements in the subsidence depression near Karviná. *Acta geodynamica et geomaterialia*, Vol. 7, No. 3, 355-361, 2010. ISSN 1214-9705.
- DOLEŽALOVÁ H., KAJZAR V., SOUČEK K., STAŠ L., ŠIMKOVIČOVÁ J. Creating of observation station for monitoring surface influences of underground mining under nontrivial geo-mechanical conditions. *Proceedings of XIII. International Congress of International Society for Mine Surveying*. Budapešť: ISM, 2007. ISBN 978-963-9038-18-9.
- DOPITA M., et al. *Geologie české části hornoslezské pánve*. Praha: MŽP ČR, 1997. 278 s. ISBN 80-7212-011-5.
- KADLEČÍK P., SCHENK V., SEIDLOVÁ Z., SCHENKOVÁ Z. Analysis of vertical movements detected by radar interferometry in urban areas. *Acta geodynamica et geomaterialia*, Vol. 7, No. 3, 371–380, 2010. ISSN 1214-9705.
- KAJZAR V. Programové řešení analýzy horizontálních posunů sledovaných bodů a jejich vizualizace. *Sborník příspěvků z Workshoptu doktorandů*, ÚGN AV ČR, 2010. ISBN 978-80-86407-96-8.
- KAJZAR V., DOLEŽALOVÁ H., SOUČEK K., STAŠ L. Aerial photogrammetry observation of the subsidence depression near Karviná. *Acta geodynamica et geomaterialia*, Vol. 8, No. 3, 2011. ISSN 1214-9705. V tisku.

Autoři

- ¹ Ing. Hana Doležalová, Ph.D., Ústav geoniky AVČR, v.v.i., Studentská 1768, Ostrava-Poruba; dolezalova@ugn.cas.cz
- ² Ing. Vlastimil Kajzar, Ústav geoniky AVČR, v.v.i., Studentská 1768, Ostrava-Poruba; kajzar@ugn.cas.cz
- ³ Ing. Kamil Souček, Ph.D., Ústav geoniky AVČR, v.v.i., Studentská 1768, Ostrava-Poruba; soucek@ugn.cas.cz
- ⁴ RNDr. Lubomír Staš, CSc., Ústav geoniky AVČR, v.v.i., Studentská 1768, Ostrava-Poruba; stas@ugn.cas.cz