

SLEDOVÁNÍ POVRCHOVÝCH PROJEVŮ PODDOLOVÁNÍ LETECKOU FOTOGRAMMETRIÍ USING AERIAL PHOTOGRAMMETRY TO OBSERVE SURFACE UNDERMINING PROCESSES

Vlastimil Kajzar¹, Hana Doležalová², Kamil Souček³, Lubomír Staš⁴

Abstrakt

Povrchové projevy poddolování jsou nejčastěji sledovány pomocí klasických geodetických metod. Zejména se k tomuto účelu využívá měření výšek pomocí geometrické nivelace. Povrch ovlivněný hlubinnou těžbou se však velmi často mění nejen v důsledku přímého poddolování, ale také vlivem rekultivačních prací, kdy především několikametrové navážky výrazně mění ráz krajiny. Letecká fotogrammetrie je metodou, která umožňuje na základě zpracování a vyhodnocení leteckých snímků určit prostorovou polohu studovaných prvků s měřickou přesností a její vhodná aplikace může být pro sledování povrchových změn v důsledku hlubinné těžby a souvisejících rekultivačních prací značným přínosem. Opakovaná letecká snímkování lokality Louky u Karviné ukázala na rozsah a velikost těchto povrchových změn.

Abstract

Surface manifestations of undermining are often monitored by conventional surveying methods, mostly using levelling. However, the surface affected by underground mining is often changing not only due to direct undermining, but also due to reclamation, especially when several meters high spoil deposits significantly change the landscape. Aerial photogrammetry is a method that allows determining the spatial position of the studied elements with the surveying precision and its application may be suitable for monitoring of the surface changes caused by underground mining and related reclamation. Repeated aerial photogrammetry at Louky locality near Karviná showed the range and size of these surface changes.

Klíčová slova

poddolování, letecká fotogrammetrie, změny povrchu

Keywords

undermining, aerial photogrammetry, the surface changes

1 Úvod

Projevům hlubinné těžby uhelných ložisek v podmínkách Hornoslezské uhelné pánve se věnují práce řady autorů, z nichž k nejvýznamnějším patří Knothe 1953 a Neset 1984. Povrchové pohyby a deformace byly v minulých desetiletích sledovány různými

geodetickými metodami (Schenk 1999). Také Ústav geoniky AV ČR se problematice hlubinné těžby uhelných ložisek na Karvinsku dlouhodobě věnuje. V rámci řešení projektu GA ČR 105/07/1586 „Charakter a rozvoj fází pohybů a deformací povrchu nad exploatovanými ložisky sedimentárního typu v netriviálních geomechanických podmínkách“ bylo v roce 2006 vybudováno bodové pole pro sledování poklesové kotliny na lokalitě Louky u Karviné pomocí metody GNSS. V zájmové oblasti bylo stabilizováno přibližně sto bodů, na kterých bylo opakovaně prováděno měření prostorové polohy pomocí statické metody GNSS. Ze změny polohy jednotlivých bodů v čase pak byl analyzován bodově i plošně pokles povrchu, velikost a směr horizontálních posunů, povrchové změny v čase aj. (Doležalová et al. 2009, Doležalová et al. 2010, Doležalová et al. 2012).

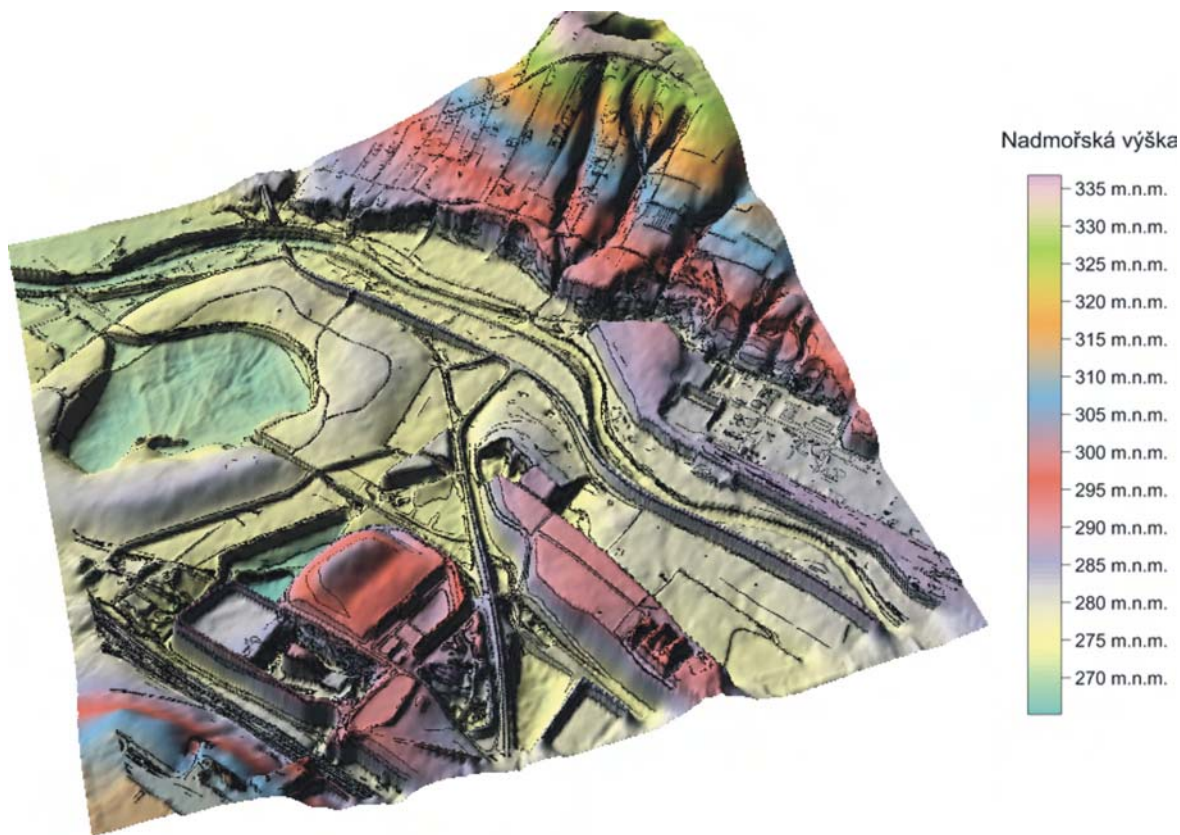
Provádět opakovaná GNSS měření na bodech bodového pole se v dané oblasti z dlouhodobého hlediska ukázalo jako značně komplikované. Povrch ovlivněný hlubinnou těžbou se zde velmi často měnil nejen v důsledku přímého poddolování, ale také vlivem tvorby odvalů důlní hlušiny nebo obnovy krajiny (dále souhrnně označované pojmem rekultivační práce). Především několikametrové navážky materiálu výrazně mění ráz krajiny a značně komplikují nebo přímo znemožňují ke sledování povrchu využít přímých měřických metod. Nepravidelností sítě, resp. nedostatkem bodů v oblastech s omezenou přístupností nebo využitelností jsou dále ovlivněny i konečné výsledky modelování poklesové kotliny.

Letecká fotogrammetrie jako nepřímá měřická metoda je jednou z metod dálkového průzkumu Země, která umožňuje na základě zpracování a vyhodnocení leteckých snímků určit prostorovou polohu studovaných prvků s měřickou přesností. Nejširší praktické využití nachází letecká fotogrammetrie při zhotovování a aktualizaci mapových podkladů. Díky jedinečné schopnosti zachytit při snímkování během jediného okamžiku celou zájmovou oblast, může být její využití pro sledování povrchových změn v důsledku hlubinné těžby a souvisejících rekultivačních prací značným přínosem. Díky této metodě bylo možné sledovat povrchové změny v rozsahu celé poklesové kotliny i jejího nejbližšího okolí.

Zájmová lokalita Louky v blízkosti Karviné se nachází v severní části důlního pole Dolu ČSM-sever na hranici dobývacího prostoru s Dolem Darkov, na východě je ohraničena 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 (podrobněji viz Doležalová et al. 2009). V území ovlivněném předchozí těžbou v devadesátých letech bylo od roku 2006 do současnosti těženo několik porubů s horizontálním uložením sloje. Těžba probíhala cca 1000 m pod povrchem, dobývaná mocnost se pohybovala od 1,4 do 3,2 m.

2 Letecká fotogrammetrie

Letecké snímkování řešené dodavatelsky se uskutečnilo celkem třikrát, a to v letech 2007 až 2009. Jednotlivé snímkové kampaně se uskutečnily vždy na jaře poté, co roztál sníh, ale před tím, než došlo k obnovení vegetačního pokryvu, což tvořilo spolu se slunečným počasím ideální podmínky pro realizaci snímkování. Letecky nasnímaná byla širší zájmová oblast o rozměrech cca 2,5 x 2,5 km. Nálety



Obr. 1 Digitální model terénu z dat letecké fotogrammetrie z roku 2009
(Kajzar 2011)

Dodaným výstupem každé snímkové mise byla sada prostorových souřadnic několika tisíc povrchových bodů plošně reprezentujících celou studovanou lokalitu. Každý bod je definován souřadnicemi určujícími jeho prostorovou polohu. Jednotlivé body jsou na většině povrchu rozmístěny v pravidelné mřížce s krokem 20 m. Lokálně lze nalézt místa, kde je rozmístění bodů nepravidelné a rovněž místa, kde se prostorová poloha vůbec neurčovala (např. vodní plochy). Spolu se sadou povrchových bodů byla dodána sada prostorových souřadnic lomových bodů terénních hran, reprezentujících výrazné liniové prvky v krajině. Dodaná data jsou v souřadnicovém systému WGS 84, ETRF89, zobrazení UTM, pás 34. Primárně jsou tato data určena k tvorbě digitálních modelů terénu (DMT), viz ukázka na obr. 1. DMT lze chápat jako digitální reprezentaci zemského povrchu v paměti počítače, vytvořenou na základě vstupních prostorových dat pomocí vybraného interpolačního algoritmu. Srovnáním DMT z jednotlivých let je možné určit časoprostorové změny studovaného povrchu (Kajzar 2011).

byly provedeny dle zadávacího nákresu ve směru východ – západ v několika náletových osách. Požadovaný minimální překryv snímků byl v podélném směru 60 % a v příčném směru 30 % (Kajzar 2011).

Při prvním snímkování v roce 2007 byla použita analogová kamera, další snímkování v letech 2008 a 2009 byla provedena novou digitální kamerou. Souhrnný přehled parametrů jednotlivých fotogrammetrických kampaní je uveden v tabulce 1.

Před samotným leteckým snímkováním byly v rozích a ve středu snímané lokality signalizovány a následně metodou GNSS zaměřeny tzv. vlíčovací body, nutné k ortorektifikaci snímků.

Pro ověření přesnosti a vhodnosti využití metody letecké fotogrammetrie pro stanovené účely byla spolu s vlíčovacími body signalizována a následně polohově zaměřena většina bodů pozorovací sítě GNSS. Část bodů byla signalizována pomocí bílých čtvercových plechových terčů o velikosti 20 x 20 cm. Body na pozemních komunikacích byly signalizovány kruhovou značkou o průměru 20 cm nastříkanou bílou reflexní barvou. Vlícovací body byly označeny stejným způsobem značkou čtvercového tvaru.

Tab. 1 Parametry fotogrammetrických snímkování

Fotogrammetrické snímkování	2007	2008	2009
Datum snímkování	5. 3. 2007	31. 3. 2008	4. 4. 2009
Snímkovací kamera	Zeiss LMK 2015	Vexcel UltraCam X	Vexcel UltraCam X
Výška letu nad terénem	608 m	900 m	900 m
Měřítko	1 : 4 000	1 : 9 000	1 : 9 000
Ohnisková vzdálenost	152 mm	100 mm	100 mm
Snímkování	4 řady x 8 snímků	4 řady x 12 snímků	4 řady x 12 snímků
Velikost pixelu	skenováno na 5 cm	7 cm	7 cm
Software použitý pro aerotriangulaci	MATCH-AT		MATCH-AT
Software stereoskopického vyhodnocení	Summit Evolution		Dephos
Počet povrchových bodů	17 197	13 550	13 968
Počet terénních hran	5 845	13 047	9 665
Počet zaměřených GNSS bodů	46	71	76

Druhou skupinou dodaných dat byly sady prostorových souřadnic signalizovaných bodů pozorovací sítě GNSS. Tyto datové sady byly pořízeny za účelem provedení srovnávací analýzy s daty z pozemních GNSS měření, realizovaných v době snímkování, k zajištění představy o přesnosti určení prostorové polohy bodů dodaných základních datových sad.

Z výsledků provedených srovnání (viz tabulka 2) je zřejmé, že nejvyšší shody v určení prostorové polohy jednotlivými měřickými metodami bylo dosaženo při kampani v roce 2009. Téměř u všech bodů byl zjištěn vzájemný rozdíl v určení polohy do 10 cm, přibližně u tří čtvrtin bodů do 5 cm.

Na rozdíl od poslední fotogrammetrické kampaně byla u předešlých kampaní míra vzájemných rozdílů v určení polohy mnohem vyšší. V obou letech byl u přibližně 40 % analyzovaných bodů zaznamenán rozdíl přesahující 10 cm.

Prostorové rozložení bodů vykazujících takto výrazných rozdílů bylo velmi variabilní a nebyla zde odhalena žádná systematická složka chyby, kterou by bylo možné případně eliminovat.

Tab. 2 Shoda v určení prostorové polohy bodů metodou GNSS a leteckou fotogrammetrií

Rok snímkování		2007	2008	2009
Počet srovnávaných bodů		46	71	76
Shoda do 10 cm rozdílu	v horizontální poloze	87 %	92 %	99 %
	ve vertikální poloze	67 %	68 %	97 %
	v prostorovém určení	61 %	59 %	97 %
Shoda do 5 cm rozdílu	v horizontální poloze	52 %	66 %	92 %
	ve vertikální poloze	48 %	37 %	75 %
	v prostorovém určení	28 %	24 %	72 %

s prostorovým rozlišením 10 m bylo využito geostatistické metody krigování s lineárním modelem semivariogramu. Porovnáním těchto DMT, resp. výpočtem rozdílového modelu využitím mapové algebry lze vyhodnotit povrchové změny, ke kterým za určitá období došlo.

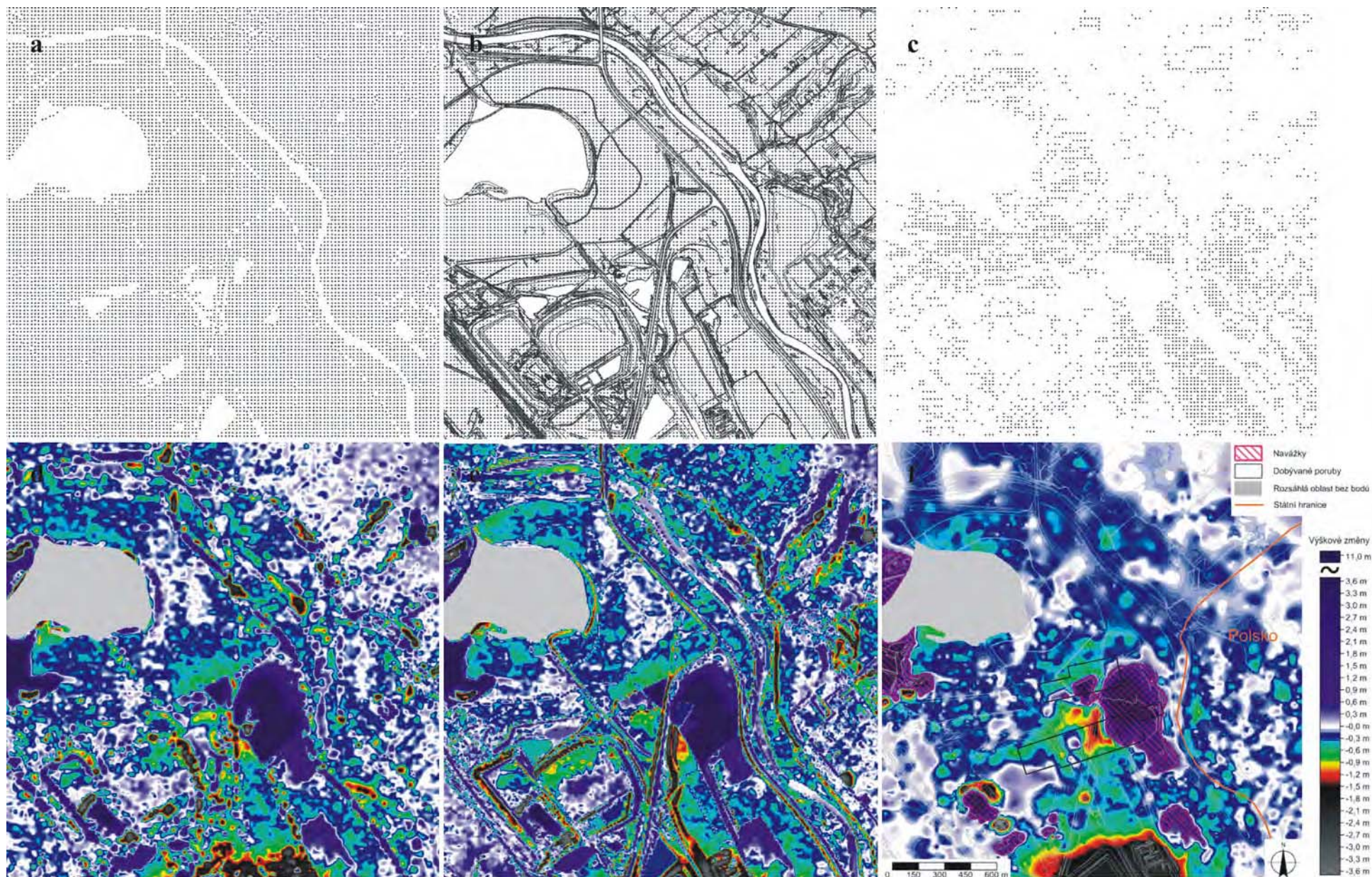
Prvním typem DMT byl model vytvořený na základě sady několika tisíc povrchových bodů viz obr. 2a. Druhým pak model vytvořený opět ze sady těchto bodů, k nimž byly dále přidány i terénní hrany, tj. průběhy významných terénních hran, přechodů různých typů povrchu, ohraničení silnic, mostů a jiných významných liniových a polygonových prvků v krajině. Po vytvoření těchto dvou typů DMT ke každé fotogrammetrické kampani byly na jejich základě vypočteny rozdílové modely vyjadřující výškové změny povrchu pro každé z období 2007–2008, 2008–2009 a 2007–2009. Ani jeden z konečných rozdílových modelů (viz obr. 2d, 2e) však neumožňoval celoplošné hodnocení oblasti. Důvodem byly rozdíly v počtu a zejména poloze vstupních prvků, tzn. bodů a linií z jednotlivých fotogrammetrických kampaní. V případě členitého a rychle se měnícího terénu, kdy je navíc vyžadována vysoká přesnost dosažených výsledků (v řádu cm), není možné pro korektní hodnocení výškových změn povrchu použít prvky s rozdílnou polohou, byť jsou si tyto prvky polohově mnohdy velmi blízké. Jisté dílčí závěry lze v tomto případě odvozovat pouze pro menší homogenní podoblasti, nikoliv však pro celou zájmovou oblast.

Vhodnějším řešením je proto srovnání digitálních modelů vytvořených na základě souboru identických (koincidenčních) povrchových bodů. Jedná se o body reprezentující povrch ve stejném místě v obou zpracovávaných datových sadách (letech). Byly získány srovnávací analýzou dodaných sad povrchových bodů. Tato podmínka byla splněna vždy jen u části bodů dvojice zpracovávaných datových sad, viz obr. 2c. I přes toto omezení poskytují výsledné rozdílové modely (viz obr. 2f) nejlepší možnou představu o výškových změnách povrchu, zvláště v částech pokrytých dostatečným množstvím koincidenčních bodů. Modely lze charakterizovat jako relativně vyhlazené, sporadicky se zde vyskytují prudké změny hodnot v malé ploše. Je na místě připomenout, že výsledné rozdílové modely mohou

Uvažujeme-li chybu určení prostorové polohy použitou metodou měření GNSS 2–3 cm, analýzou výsledků srovnání docházíme k závěru, že zejména u prvních dvou kampaní je část dat z fotogrammetrie se značnou pravděpodobností (až 40 %) zatížena chybou v určení prostorové polohy, přesahující 10 cm. Tuto skutečnost bylo proto nutné při dalším hodnocení zohledňovat.

3 Vyhodnocení povrchových změn z letecké fotogrammetrie

Ke každé fotogrammetrické kampani bylo vytvořeno několik typů již zmíněných digitálních modelů terénu, vzájemně se lišících použitými vstupními daty. K tvorbě gridů DMT



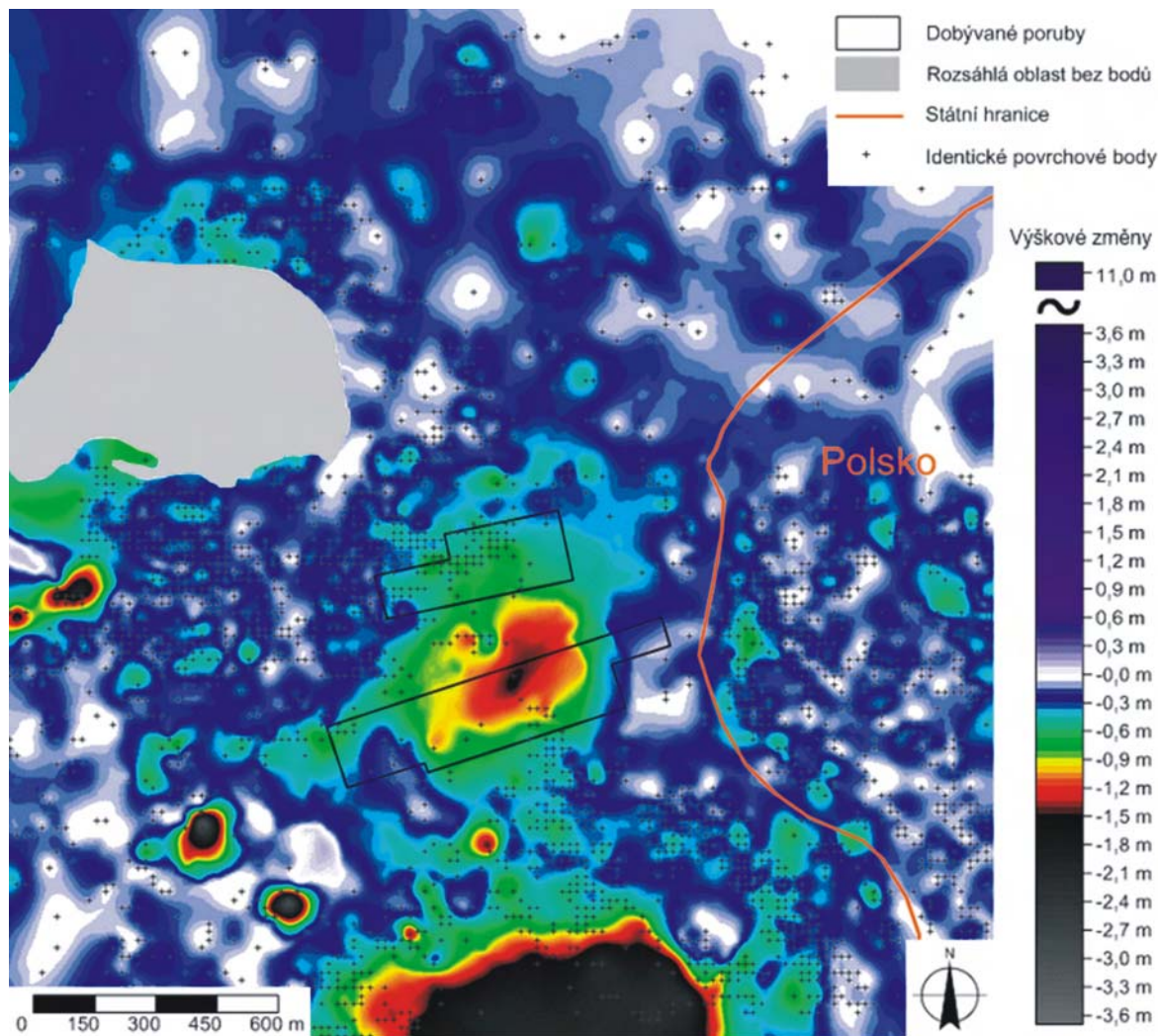
Obr. 2 Varianty vyhodnocení deformací povrchu z dat letecké fotogrammetrie - horní řada vstupy pro tvorbu DMT: a) povrchové body 2009; b) povrchové body + terénní hrany 2009; c) koincidenční body v letech 2007 a 2009. Spodní řada - rozdílový model DMT 2007 a DMT 2009 vytvořený: d) z povrchových bodů; e) z povrchových bodů + terénních hran; f) koincidenčních bodů (Kajzar 2011)

být ovlivněny nepřesností v určení vstupních dat analogicky k výsledkům provedené srovnávací analýzy (viz tabulka 2), což samozřejmě může komplikovat provedení korektního hodnocení (Kajzar 2011, Kajzar et al. 2011).

Pro vyhodnocení povrchových změn máme tedy k dispozici rozdílové modely pro období 2007–2008, 2008–2009 a 2007–2009. V těchto letech byl povrch přetvářen intenzivními rekultivačními pracemi a dobýváním zejména dvou porubů, severního dobývaného v období 10/2006–6/2007 a jižního dobývaného v rozmezí 5/2007–4/2008, viz obr. 3. Začátkem roku 2009 započalo dobývání 2. lávky sloje u severní poruby.

Provedená GNSS měření ukázala, že k největším poklesům terénu došlo podle očekávání v důsledku dobývání jižního porubu, který se vyznačoval vysokou dobývanou mocností sloje. Z rozdílových modelů vypočtených na základě koincidenčních bodů lze vyvodit, že zatímco během prvního fotogrammetricky zpracovávaného období 2007–2008 došlo k velmi výrazným poklesům povrchu, během druhého období 2008–2009 byly zaznamenány poklesy mnohem nižší. Hlavním důvodem nižších poklesů bylo především přibližně osmiměsíční období přerušení těžebních prací u sledovaných porubů. Celková hodnota poklesů za druhé období tehdy nepřekročila 25 cm, což při přesnosti metody, resp. přesnosti vstupních dat letecké fotogrammetrie (± 10 až 20 cm) neumožňuje věrohodnou interpretaci výsledků. Pro posuzování výškových změn je proto vhodnější analyzovat období 2007–2009.

Míra zjištěných výškových změn za celkové dvouleté období 2007–2009 je graficky znázorněna na obr. 2f. Na tomto modelu je možné jasně vymezit velké části povrchu, u nichž došlo k výraznému zvýšení, a to až o 11 m (fialové šrafované plochy), související především s tvorbou odvalů a následnou rekultivací území. Navýšený terén zasahuje i do středové části modelu, tedy do oblasti nad sledovanými poruby, a tím značně omezuje možnost plošného hodnocení poklesů terénu.



Obr. 3 Model poklesů povrchu za období mezi snímkováním 2007 a 2009 generovaný na základě identických bodů nevykazujících za hodnocené období výzdvih (Kajzar 2011)

Popisované navážky je možné eliminovat vytvořením rozdílového modelu vycházejícího z koincidenčních bodů vykazujících za studované období pouze pokles, viz obr. 3. Ačkoliv tento přístup vede k další redukci již omezeného množství vstupních dat, lze i přesto dojít k zajímavým závěrům. Takto vytvořený model popisující celkovou míru a rozsah poklesů za období 2007–2009 je prezentován na obr. 3. Přibližně v jeho středu je možné vypočítat nově vzniklou poklesovou kotlinu. Tato kotlina se utvořila nad dvojicí sledovaných porubů. Její střed se nachází nad střední částí severní hrany jižního porubu. Zjištěné hodnoty poklesů v těchto místech dosahují až 1,5 m. Na okrajích poklesové kotliny, zvláště v bezprostředním okolí severně položeného porubu, kde se nalézá velké množství vstupních bodů, je možné rozeznat oblast poklesů do 50 cm. Velikost poklesů zde se vzrůstající vzdáleností rychle klesá. Tvar poklesové kotliny i velikost poklesů je však vhodné analyzovat vzhledem k rozložení vstupních bodů. Hodnoty v místech s menším množstvím vstupních bodů jsou značně závislé na hodnotách zjištěných v okolí a na použité interpolační metodě a nemusí vždy vyjadřovat skutečnou míru poklesů. Dalším nedostatkem této metody může být nepřesné vyjádření hodnoty poklesu v místech, kde velikost navážky nepřesahuje velikost poklesu. I přes tato omezení však výsledky provedené analýzy docela dobře korespondují s výsledky vyhodnocení GNSS měření v dané lokalitě (Doležalová et al. 2009).

Mimo část území ovlivněnou sledovanými poruby je z předložených analýz rovněž možné vysledovat výraznější vlivy poddolování mimo zájmovou oblast, projevující se výrazným poklesem terénu především v jižní části snímaného území. Jejich výskyt potvrzuje závěry analýzy horizontálních posunů prováděné na základě měření GNSS (Doležalová et al. 2010, Kajzar et al. 2011). Lokálně se zde vyskytují rovněž malé plochy vykazující výrazné poklesy v řádu metrů. Jedná se zejména o plochy, u kterých došlo k odtěžení povrchového materiálu. Celkově je z prezentovaných výsledků patrné, že hlubinnou těžbou je zasažena značná, zejména česká, část snímaného území. Případný vliv dobývání sledovaných porubů je na polské části snímaného území možné na základě prezentovaných výsledků vyloučit.

4 Závěr

Letecká fotogrammetrie je metodou, která umožňuje určit prostorovou polohu bodů a z jejího opakovaného použití na stejném území je možné určit povrchové změny. Nabízí tak možnost sledovat poddolovanou oblast v celém jejím rozsahu, a to s konzistentní přesností. Přesnost této metody závisí na řadě faktorů a reálně je třeba počítat s odchylkami cca 10–30 cm ve vertikálním směru. Při sledování povrchových změn způsobených poddolováním se proto doporučuje její použití tam, kde se předpokládají značné výškové změny terénu. Pozemní geodetické metody sice mohou povrchové projevy poddolování zaznamenat i s výrazně vyšší přesností, jde však o metody, které nemohou postihnout celou poklesovou kotlinu. V některých rychle se měnících oblastech je navíc použití běžných geodetických metod dosti omezené nebo dokonce možné. Letecká fotogrammetrie tak i přes nižší přesnost přináší, díky schopnosti zaznamenat během krátkého okamžiku celou sledovanou oblast, významně přispívá k hodnověrnému posuzování velikosti a rozsahu povrchových změn způsobených hlubinnou těžbou a rekultivací.

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. Tato práce byla dále podpořena Evropským fondem regionálního rozvoje (ERDF) v rámci projektu Centra excelence IT4Innovations (CZ.1.05/1.1.00/02.0070) a projektem SPOMECH – Vytvoření multidisciplinárního vědeckovýzkumného týmu pro spolehlivé řešení úloh mechaniky, reg. č. CZ.1.07/2.3.00/20.0070 v rámci Operačního programu Vzdělávání pro konkurenceschopnost a financovaného ze strukturálních fondů EU a státního rozpočtu ČR.

Literatura

- 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. Analysis of surface movements from undermining in time. *Acta geodynamica et geomaterialia*, Vol. 9, No. 3, 2012. ISSN 1214–9705. V tisku.
- DOLEŽALOVÁ H., KAJZAR V., SOUČEK K., STAŠ L. Analýza geodetických měření poddolovaného území. *EGRSE. Exploration Geophysics, Remote Sensing and Environment*. Roč. 18, č. 3, 2011, s. 27–36. 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.
- DOPITA M., et al. *Geologie české části hornoslezské pánve*. Praha: MŽP ČR, 1997. 278 s. ISBN 80–7212-011–5.
- KAJZAR V. *Modelování následků dobývání ložisek nerostných surovin. Disertační práce*. Ostrava: ÚGN AV ČR, VŠB-TU Ostrava, 2011. 137 s.
- 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, s. 309–317. ISSN 1214–9705.
- KNOTHE, S.: Vplyv času na kstalcowanie sie niecki osiadania, *Archiwum Górnictwa i Hutnictwa*. Warszawa, 1953.
- NESET, K.: *Vlivy poddolování*. SNTL Praha 1984
- SCHENK, J. *Měření pohybů a deformací v poklesové kotlině*. Ostrava, VŠB-TU Ostrava, 1999, ISBN 80–7078-711–2.

Autoři

¹ Ing. Vlastimil Kajzar, Ústav geoniky AV ČR, v.v.i., Studentská 1768, Ostrava-Poruba; kajzar@ugn.cas.cz

² Ing. Hana Doležalová, Ph.D., Ústav geoniky AV ČR, v.v.i., Studentská 1768, Ostrava-Poruba; dolezalova@ugn.cas.cz

³ Ing. Kamil Souček, Ph.D., Ústav geoniky AV ČR, v.v.i., Studentská 1768, Ostrava-Poruba; soucek@ugn.cas.cz

⁴ RNDr. Lubomír Staš, CSc., Ústav geoniky AV ČR, v.v.i., Studentská 1768, Ostrava-Poruba; stas@ugn.cas.cz