

Výpočty objemů odtěžených hmot v reálném čase

Ing. Dana Sládková, Ph.D.¹, Ing. Roman Kapica, Ph.D.¹, Ing. Martin Vrabel, Ph.D.², Ing. Markéta Michalusová¹

¹Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava

²Severočeské doly a.s., Doly Nástup Tušimice, Kadaň, vrubel@sdas.cz

Přijato: 25. 1. 2012, recenzováno: 21. 2. a 14. 3. 2012

Abstrakt

Hlavním smyslem systému pro určování prostorové polohy kola rýpadel je rozšířit systém řízení povrchového dobývání. Vizualizace prostorové polohy kola a sledování jeho pohybu v reálném čase jsou prováděny programem Báňský model firmy KVASoftware. Jedním z nejdůležitějších úkolů důlních měřičů je výpočet objemů odtěžených hmot. Popisovaný systém provádí tuto úlohu v reálném čase. V článku je popsána aplikace, která je pro automatizaci výpočtů objemů použita.

Real time calculation of extracted mass volume

The main purpose of the bucket wheel positioning system is to improve the control system of opencast mining operations. The real time visualization of bucket wheel spatial position and its movement is provided by the GNSS BANSKY MODEL, a mine modeling and planning software developed by the KVASoftware Company. One of the most important mine surveying jobs is the calculation of extracted mass volume. The system described in the paper (GNSS BANSKY MODEL) enables to execute this task in real time. The paper describes an application which is used for the automation of volume calculation.

Volumenberechnungen der geförderten Massen in einer realen Zeit

Der Hauptzweck des Systems für die Bestimmung der Raumlage eines Schaufelradbaggers ist das Steuerungssystem der Förderung im Tagebau zu erweitern. Die Visualisierung der Raumlage des Schaufelrades und die Verfolgung dessen Bewegung in einer realen Zeit werden durch das Programm Bergmodell der Firma KVASoftware vorgenommen. Eine der wichtigsten Aufgaben der Markscheider ist die Berechnung des Volumens der geförderten Massen. Das beschriebene System vornimmt diese Aufgabe in einer realen Zeit. Im Artikel wird die Applikation beschrieben, die für die Automatisierung der Volumenberechnungen eingesetzt wurde.

Klíčová slova: kolesové rýpadlo, digitální model terénu, GNSS, GNSS Báňský model, trojrozměrný (3D), výpočet objemů.

Keywords: bucket wheel excavator; digital terrain model; GNSS; GNSS Banský model, three-dimensional (3D), volume calculating.

1 Úvod

V čísle 2/2007 [4] tohoto časopisu byl otištěn příspěvek popisující systém pro určování polohy kola rýpadel v reálném čase. Na lomech Severočeských dolů a.s. jsou na některých rýpadlech nainstalovány systémy zahrnující GNSS přístroje, měřidla sklonu a inkrementální snímače otáček. Výsledkem měření jsou opakované výpočty prostorové polohy kola. Znalost polohy kola vůči digitálnímu modelu terénu (lomu) i geologickému modelu je důležitá pro realizaci celé řady aplikací. Některé z nich byly podrobněji popsány v čísle 4/2009 [3]. Jednou z novějších aplikací je výpočet objemu odtěžených hmot.

2 Principy výpočtu

Při povrchovém dobývání uhlí, ale i některých dalších nerostů v České republice, dochází k těžbě, dopravě, ukládání, skládování obrovského objemu hmot, a to jak samotného hlavního těženého nerostu, tak i potřebného objemu nadloží, hlusiny, výklizů, proplástek, doprovodných surovin a někdy i nutného objemu podloží. Tak například jen v roce 2011 byly v Severo-

českých dolech a.s. vytěženy, přemístěny a případně založeny objemy hmot, které jsou uvedeny v tabulce č. 1.

Jedním z hlavních a nejpravidelnějších úkolů důlních měřičů na povrchových lomech jsou proto výpočty objemů. Jedná se zároveň i o jeden z nejkomplexnějších a nejzodpovědnějších úkolů.

2.1 Definování ploch v digitálním modelu

Princip výpočtu objemů je pomocí softwaru GNSS Báňský model odvozen z principu definování plochy v digitálním modelu terénu lomu pomocí programu „Báňský model“ firmy KVASoftware [1]. Všechna zdrojová data (objekty) vstupující do popisu ploch musí být vektory (i singulární). Program provede vygenerování obecné trojúhelníkové sítě (obrázek č. 2), kdy každý ze zaměřených bodů musí být vrcholem trojúhelníka.

Každý trojúhelník v trojúhelníkové síti modelu představuje elementární rovinnou plochu (obrázek č. 3) definovanou v prostoru třemi body (vrcholy trojúhelníka) XA, YA, ZA a XB, YB, ZB a XC, YC, ZC. Jednou ze základních úloh programu,

Tab. 1: Těžba skrývky a uhlí v Severočeských dolech a.s. v roce 2011.

	Doly Nástup Tušimice	Doly Bílina	Severočeské doly a.s.
Těžba skrývky [m ³]	26 738 388	47 016 126	73 754 514
Hrubá těžba uhlí [t]	14 852 906	10 357 675	25 210 581



Obr. 1: Letecký snímek lomu Libouš.

nutných pro optimalizaci digitálního modelu a nejrůznější aplikace včetně výpočtů objemů, je výpočet neznámé souřadnice ZN pro zadaný obecný bod N o známých souřadnicích XN, YN. Je nalezen trojúhelník, v jehož elementární ploše bude tento bod ležet. Poté lze bodu ležícímu na známé ploše vypočítat chybějící souřadnici Z. Z rovnice plochy určené třemi vrcholy trojúhelníka A, B, C je pomocí determinantů vypočítána hledaná souřadnice Z bodu N.

2.2 Princip výpočtů objemů

Princip všech výpočtů objemů a odvozených výpočtů (hmotnost, kvalitativní parametry suroviny apod.) je závislý na existenci dvou známých 3D ploch, jejichž geometrie je určena trojúhelníkovými sítěmi digitálního modelu. Výpočet objemu probíhá mezi dvěma plochami, tj. mezi dvěma modely. Jedná se například o objem mezi MASTER modelem (zaměřený výchozí stav lomu) a REFERENČNÍM modelem (změnový model po odtěžení dílčí části lomu).

Základním elementem výpočtu je vždy kolmý trojboký hranol s obecnými rovinnými základnami (obrázek č. 4). Parametrem výpočtu je celočíselná hodnota udávající maximální povolenou plochu elementárního trojúhelníka základny v $[m^2]$.

Program v rámci výpočtu jako první krok provádí rekurzivně rekonfiguraci základní trojúhelníkové sítě tak dlouho, dokud každý z trojúhelníků nemá plochu menší nebo rovnou zadané hodnotě parametru.

Elementární objem:

- kladná hodnota - plocha MASTER modelu je „nad“ plochou REFERENČNÍHO modelu,

- záporná hodnota - plocha MASTER modelu je „pod“ plochou REFERENČNÍHO modelu.

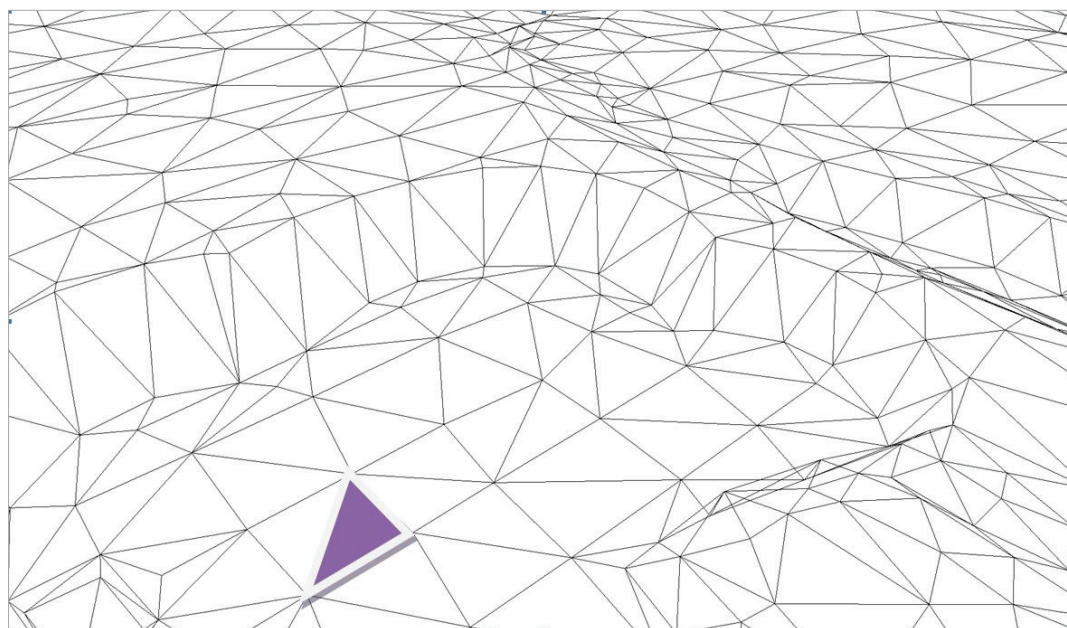
Celkový objem výpočtu je pak dán iteračním součtem elementárních objemů přes všechny prvky trojúhelníkové sítě. Zvlášť jsou iterovány hodnoty kladných objemů (většinou interpretovány jako objem „nasypaného“ materiálu) a zvlášť hodnoty záporných objemů (většinou interpretovány jako objem „odtěženého“ materiálu).

2.3 Výpočty objemů v systému pro výpočet prostorové polohy kola rýpadla

Výše uvedené základní principy výpočtu hmot jsou systémem pro výpočet prostorové polohy kola rýpadla aplikovány i pro průběžné výpočty objemů odtěžených hmot. Program pracuje s prvky, které byly nazvány „dynamické mapy GNSS“. Dynamickou mapou GNSS v aplikacích firmy KVASoftware se rozumí systém parciálních indexových matic a popisu aktivních prvků matic soustavou rovnic tak, aby bylo možné v čase dynamicky prvky matic definovat a modifikovat. Výsledkem je dynamický model popisující prostor zasažený „těžbou“ – tj. v prostředí programu parametrickým modelem válce kola konkrétního rýpadla sledovaného pomocí GPS.

Používaný způsob popisu ploch dynamické mapy GPS vychází z požadavku rychlé indexace prvků ploch, tj. rychlý výpočet modifikace (aktualizace) ploch, a zároveň co nejmenšího objemu dat (velikost souborů), protože data jsou sdílána po síti s řadou dalších aplikací.

Všechny výpočty se provádějí v paralelně spuštěných aplikacích nazvaných „GNSS Báňský model“ (pro každé rýpadlo



Obr. 2: Vygenerovaná trojúhelníková síť digitálního modelu terénu.

jedna aplikace) nad společným datovým prostorem. V současnosti na počítači se čtyřjádrovým procesorem (označovaný jako GPS server) mohou být paralelně spuštěny 4 aplikace GNSS Báňský model.

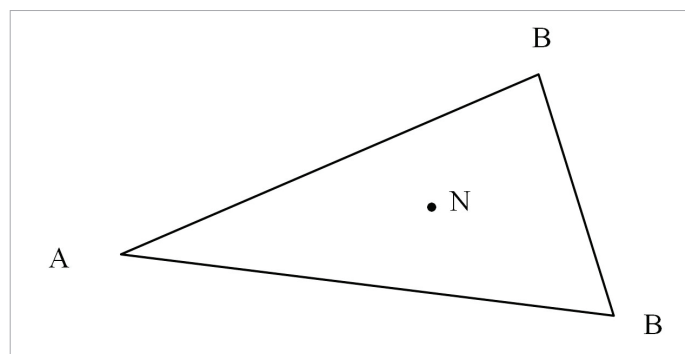
Zájmovou lokalitu lze rozdělit do neomezeného počtu partiálních indexových matic, ideálně zvlášť pro každé rýpadlo a jeho předpokládaný postup jednu matici. Matice se mohou vzájemně překrývat pro případ, že oblasti těžby jednotlivých rýpadel částečně sdílejí společný prostor. V aplikaci je zajištěno, aby v překrývajících se maticích nedocházelo k redundanci dat. Matice jsou definovány graficky v základní mapě digitálního modelu a v čase je lze libovolně editovat (zvětšovat/zmenšovat, rušit a přidávat). Každý prvek matice představuje čtverec rastru o velikosti 1 x 1 m a po iniciaci jsou prvky matice neaktivní (tj. neobsahují žádná data).

Program současně generuje model kola rýpadla jako parametricky definovaný model válce. Parametrem je průměr válce (= průměr kola) a výška válce (= šířka kola). Model válce kola je orientovaný v prostoru pomocí osy rotace kola.

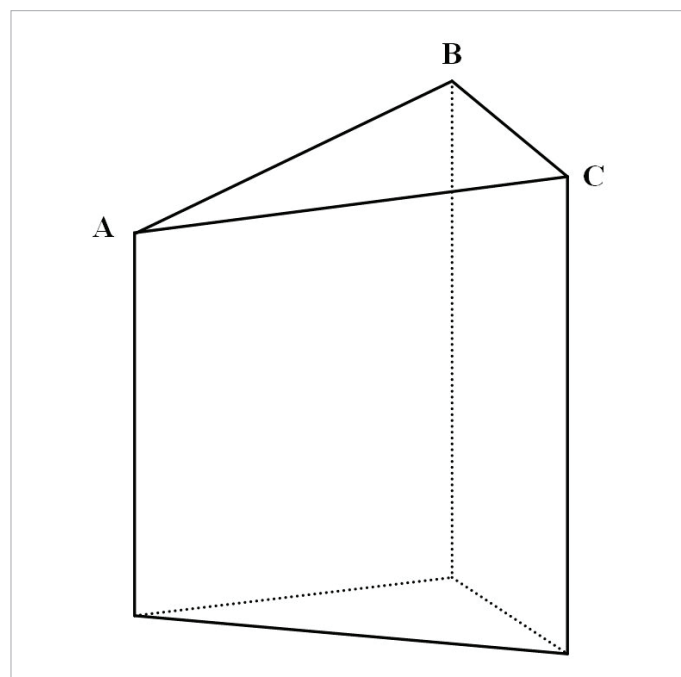
Průchodem modelu válce kola jsou „zasazené“ prvky dynamické mapy aktivovány a je jim přiřazen index do polí (souborů), která pak pro každý aktivní prvek obsahují 8 ele-

mentárních ploch (trojúhelníků, tj. rovnic rovin), viz obrázek č. 5. V aplikaci je zajištěna návaznost elementárních plošek mezi sebou i na sousední aktivní prvky matice = spojitost rovin v 1. derivaci. V aplikaci jsou aktivní prvky dynamické mapy v mapě modelu vykreslovány šedou barvou.

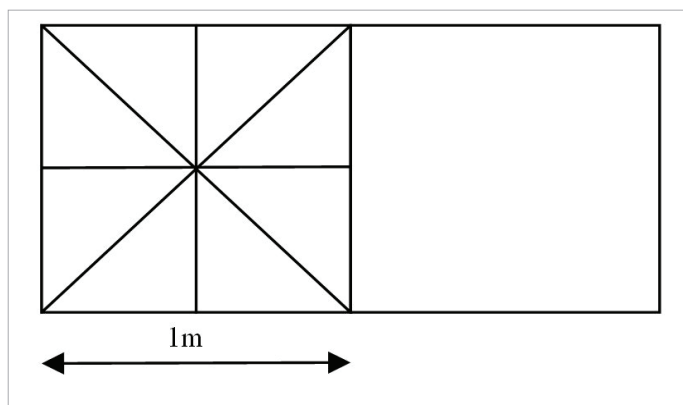
Aktivní prvek je indexem odkazován na dalších 8 elementárních ploch pro zjemnění modelu a zvýšení přesnosti výpočtu objemů [2]. Každá z elementárních ploch (trojúhelník) je popsána parametrickou rovnicí roviny, parametrem jsou souřadnice X, Y, Z vrcholů trojúhelníků v souřadnicovém systému. Zároveň je pro každý aktivovaný a modifikovaný prvek matice vložena informace s datem a přesným časem, kdy byl prvek matice aktivován/modifikován.



Obr. 3: Elementární trojúhelník digitálního modelu terénu.



Obr. 4: Trojboký hranol – základní element výpočtu objemu.



Obr. 5: Aktivní (vlevo) a neaktivní prvek (vpravo) matice o rozměru 1 x 1 m.

2.4 Výpočty – aktivace a modifikace prvků matice

Původně neaktivní prvky matice jsou aktivovány „průchodem“ modelu válce kola rýpadla. Při aktivaci prvku matice je nejprve všech 8 elementárních ploch „položeno“ na aktuální model terénu, tj. ve čtverci 1 x 1 m kopírují plochu terénu.

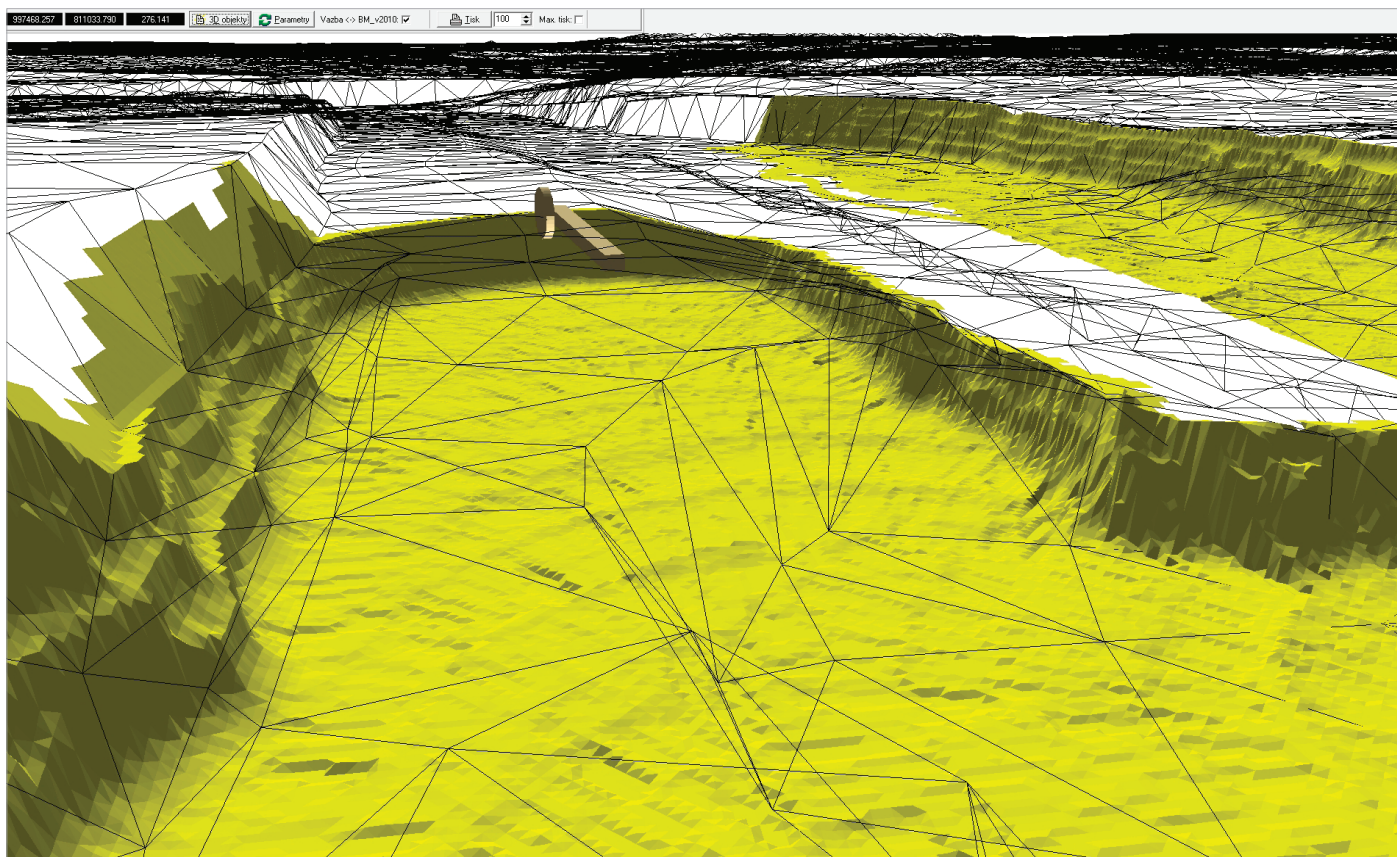
Pro tyto nové elementy plochy je následně počítán průnik s plochou válce kola. Elementy plochy, které tímto průnikem získají novou nižší kótu v kterémkoliv vrcholu, jsou modifikovány na novou hodnotu. Proti původním hodnotám souřadnice Z tak vytváří elementární trojboký hranol, který je základním prvkem pro výpočet objemu.

Na obrázku č. 6 je prostorový pohled na oblast lomu u rýpadla K800/103/N1 dne 15. 6. 2011. Drátový model znázorňuje původní zaměřený terén lomu, žlutošedě je vyznačen aktuální digitální model terénu vytvořený průchodem modelu válce kola.

Každý takový elementární trojboký hranol je poté i základním prvkem pro výpočet průniků s plochami geologického modelu a tudíž i výpočet objemových hmotností, tonáží a kvalitativních parametrů. Podobně se postupuje při modifikaci prvku matice, tj. opakovaném průchodu modelu válce kola. Pro již existující elementární plochy v prvku matice je opět počítán průnik s plochou válce kola a každá nižší kóta modifikuje původní kótu. Pokud dojde ke změně, je aktualizován datum a čas pro daný prvek matice. Při každé změně v poloze kola (v intervalu vzorkování polohy kola rýpadla každých 5 sekund) je počítán průnik s řadou elementárních ploch všech zasažených prvků matice v celé dráze kola. Kumulace všech elementárních objemů v intervalu vzorkování představuje základní prvek pro následné celkové výpočty objemů za zvolený časový interval.

2.5 Databáze s historií těžby

Pro každé rýpadlo je každý den generována databáze těžných hmot. Do databáze jsou s každým provedeným výpočtem polohy kola (každých 5 vteřin) zaznamenány datum a čas výpočtu, včetně hodnot spočítaných objemů a tonáží. Databáze tedy představuje na časové ose vynesené údaje o realizované těžbě. Z této databáze se podle nastavených kritérií výběru v čase



Obr. 6: Prostorový pohled na oblast lomu u rýpadla K800/103/N1 dne 15. 6. 2011.

sledování těžby	
Objem [m ³]	163178.5
Výkliz [m ³]	90.2
Tonáž [t]	246973.3
za aktuální:	1 hodinu
za směnu:	ranní
dne:	10. 6. 2011
za období od:	28. 4. 2011 13:00:00
do:	30. 5. 2011 11:20:59

Obr. 7: Výsledky výpočtu objemů v prověřovaném intervalu.

„od-do“ kumulací spočítá celkový objem [m³] a hmotnost těženého uhlí - „tonáž“ v [t]. Na obrázku č. 7 je komunikační okno programu. Ve zvoleném období od 28. 4. 2011 do 30. 5. 2011 bylo vytěženo celkem 163 178,5 m³ hmot. Z toho pouze 90,2 m³ byl výkliz (většinou jílové proplásky), zbytek uhelná hmota. V digitálním modelu geologických vrstev jsou uloženy i údaje o objemové hmotnosti jednotlivých uhelných lávek. Proto program vypočte rovněž i hmotnost (tonáž) vytěženého uhlí. V uvedeném případě se jedná o 246 973,3 t. Průměrná objemová hmotnost uhlí je 1,51 t/m³. V daném období bylo tedy těženo většinou uhlí s nízkou výhřevností.

2.6 Nezávislá kontrola výpočtu objemů

Měřiči na Severočeských dolech a.s. provádějí měsíční kontrolu odtěžených objemů hmot. Použitá metoda zaměření nového stavu lomu je letecká digitální fotogrammetrie (digitální komora UltraCam X). Střední pořizovaných digitálních snímků jsou ve výšce přibližně 750-800 m nad průměrnou výškou terénu a měřítko snímků je 1:7 600.

Tato metoda zaměření byla použita i pro kontrolu výpočtu objemu z dat získaných pomocí systému pro výpočet prostorové polohy kola rýpadla v reálném čase. Zaměření (pořízení snímků) stavů řezů u rýpadla K800/103/N1 podle údajů z leteckých snímků proběhlo dne 28. 4. 2011 ve 13:00 hod. a následně 30. 5. 2011 v 11:21 hod. Objem hmot odtěžených rýpadlem v tomto intervalu byl vypočten standardním měřicím postupem v prostředí digitálního modelu lomu metodou trojbokých hranolů (metoda 1). Následně byla využita databáze objemů těžených hmot v aplikaci „GNSS Báňský model“ (metoda 2). V prostředí programu byl zadán datum a čas a byl

vypočten údaj o objemu odtěžených hmot v tomto období (obrázek č. 7). Na obrázku č. 8 jsou zobrazeny modely terénu vytvořené z aktuální pozice modelu kola rýpadla K800/103/N1 v období od 28. 4. 2011, 13:00 hod (zelený model) do 30. 5. 2011, 11:20 hod (fialový model). Na obrázku je rovněž zřetelný drátový model výchozího terénu lomu (šedě). V oblasti mezi těmito třemi plochami byl popsán systém GNSS Báňský model vypočten objem.

Velmi dobře vyšlo porovnání vypočtených objemů i v dalším období od 30. 5. 2011 do 28. 6. 2011, viz tabulka č. 3.

3 Závěr

Rozdíl mezi výchozím objemem získaným standardním měřicím výpočtem z fotogrammetrických podkladů (metoda 1) a prověřovanou metodou aplikace „GNSS Báňský model“ (metoda 2) jsou minimální. Podobné rozdíly dosahujeme i při porovnání objemů získaných z dat vyhodnocením stejných leteckých snímků dvěma různými fotogrammetry. Srovnatelné výsledky byly dosaženy i u dalších dvou rýpadel, kde je systém GNSS Báňský model nasazen.

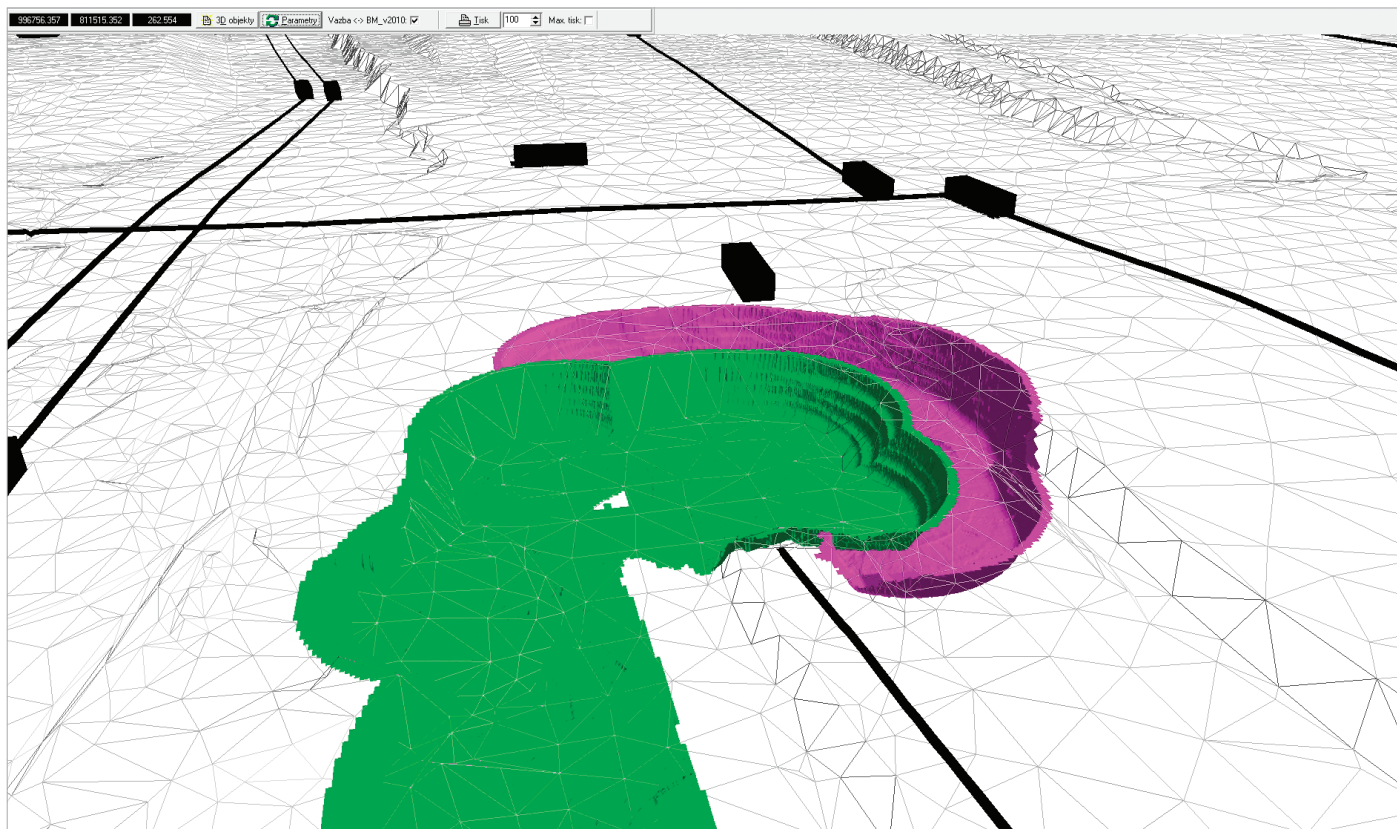
V současnosti je systém testován na třech rýpadlech v lomu Libouš. Realizuje práce, které by šly, s určitou nadsázkou, nazvat měřické práce bez přítomnosti měřiče. V reálném lomu dochází pohybem kola k odtěžování hornin a zemin. Poloha kola je známá v každém okamžiku. V digitálním modelu GNSS Báňský model dochází v reálném čase ke „kopírování“ skutečnosti. Model pláště kola postupně „proniká“ do digitálního modelu lomu. Platí pravidlo: „Tam, kde bylo koleso, není nerost“. Tak postupně dochází k vytváření nového povrchu vzniklého těžbou rýpadla.

Tab. 2: Výsledky výpočtů objemů od 28. 4. 2011 do 30. 5. 2011.

Metoda výpočtu objemu odtěženého rýpadlem v období od 28. 4. 2011 do 30. 5. 2011	Objem [m ³]	Rozdíl
Metoda 1 – z fotogrammetrického vyhodnocení lomu	163 815	
Metoda 2 – ze systému GNSS Báňský model	163 179	-0,39 %

Tab. 3: Výsledky výpočtů objemů od 30. 5. 2011 do 28. 6. 2011.

Metoda výpočtu objemu odtěženého rýpadlem v období od 30. 5. 2011 do 28. 6. 2011	Objem [m ³]	Rozdíl
Metoda 1 – z fotogrammetrického vyhodnocení lomu	167 271	
Metoda 2 – ze systému GNSS Báňský model	168 801	+0,91 %



Obr. 8: Modely terénu vytvořené z aktuální pozice modelu kola rýpadla K800/103/N1 v období od 28. 4. 2011 do 30. 5. 2011.

Problém, který ještě není zcela uspokojivě vyřešen a který brání zcela rutinnímu provozu, je bezchybný přenos dat z rýpadla na PC server, případně přenos korekcí pro GNSS systémy na rýpadlo. Několikaminutové i delší výpadky tak způsobují, že v tomto období nedojde k simulaci pohybu kola v systému a skutečně odtěžené objemy se do databáze nedostanou. Při prohlídce trojrozměrného modelu, které kolo v prostředí modelu vytváří, jsou tyto výpadky viditelné většinou jako určité „nesmyslné“ nedotěžené úseky na pojezdové pláni rýpadla. Ani po vyřešení problémů s přenosy dat však standardní měřické výkony tento systém nenahradí. Nutné je zaměřit nejen těžební řezy, ale i všechny další prostory lomu, kde došlo ke změně.

Obrovskou výhodou na druhou stranu je, že báňští technici získají údaje o odtěžených objemech s poměrně značnou přesností okamžitě po uplynutí sledovaného období, např. kalendářního měsíce – výsledky jsou přesnější, než hodnoty získané z pasových vah. Minimální rozdíly vypočtených objemů nás vedou k názoru, že stav lomu získaný na jednotlivých řezech vektorizací modelu terénu zobrazeného prostorově v systému GNSS Báňský model lze považovat za dostatečně přesný i jako výchozí stav pro běžné báňské plánování těžebních postupů rýpadla.

Literatura

- [1] MAŇAS, I.: *Princip generování ploch a výpočtů objemů v Báňském modelu*. Technická zpráva k programu, 2010.
- [2] SLÁDKOVÁ, D., KAPICA, R., VRUBEL, M.: *Global Navigation NSS Technology for Automation of Surface Mining*. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 2011, pp. 284-294, ISSN 1748-0930.
- [3] SLÁDKOVÁ, D., VRUBEL, M.: *Aplikace využívající systém pro výpočet prostorové polohy kola rýpadel na Severočeských dolech a.s.*. Zpravodaj Hnědé uhlí, 4/2009, ISSN 1213-1660.
- [4] VRUBEL, M., SLÁDKOVÁ, D., TALÁCKO, M.: *Určování polohy kola rýpadla pomocí technologie GPS na Dolech Nástup Tušimice*. Zpravodaj Hnědé uhlí, 2/2007, ISSN 1213-1660.

Vysvětlivky použitých pojmů:

GNSS - Globální družicové navigační systémy (*Global Navigation Satellite System*)

GPS - Globální polohový systém (*Global positioning System*)