

Jadwiga MACIASZEK, Paweł ĆWIAKAŁA

Akademia Górniczo - Hutnicza, Kraków

Badania możliwości zastosowania skanowania laserowego do monitoringu osuwisk zboczy wyrobisk odkrywkowych na przykładzie KWB „Bełchatów”

Słowa kluczowe

skaning laserowy, osuwiska, kopalnie odkrywkowe

Streszczenie

Deformacje zboczy kopalń odkrywkowych stanowią niezwykle ważny problem zarówno z punktu widzenia bezpieczeństwa prowadzenia eksploatacji jak i dla praktyki projektowej. Stosowane dotychczas klasyczne pomiary geodezyjne oraz fotogrametryczne pozwalają na określanie wielkości przemieszczeń poziomych i pionowych punktów w wąskim zakresie. Nowe techniki pomiarowe pozwalają na pomiar i analizę znacznie większej liczby punktów pozyskanych w niedługim czasie. W artykule omówiono zastosowanie pomiarów skanerem laserowym do potrzeb monitoringu przemieszczeń zboczy i osuwisk w kopalniach odkrywkowych. Jako przykład posłużyło duże osuwisko znajdujące na terenie KWB „Bełchatów”.

1. Wstęp

Obecnie na terenie Polski funkcjonuje ok. 4300 kopalń odkrywkowych eksploatujących takie surowce jak: węgiel brunatny, kruszywa, surowce skalne, piaski szklarskie, surowce dla potrzeb przemysłu cementowo-wapienniczego itp. Szybki rozwój sieci drogowej i autostrad, budownictwa mieszkaniowego i innych inwestycji, jaki obserwujemy w ostatnim okresie w Polsce będzie wymuszał powstawanie nowych, małych odkrywek, w których spodziewać się można powstawanie ruchów technogennych, w tym osuwisk, związanych z utratą stateczności zboczy, skarp i poziomów wyrobiska lub zwałowiska. Ruchy te mają charakter naturalny (związany z budową geologiczną złoża) i techniczny (związany z eksploatacją). Wszystkie zarejestrowane osuwiska w górnictwie odkrywkowym spowodowały zagrożenia lub utrudnienia dla ruchu zakładu górniczego.

Dla przykładu w KWK „Bełchatów” zarejestrowano , od początku prowadzenia robót górniczych ok. 50 osuwisk. Osuwisko oznaczone jako 22S (Rys. 1.1), powstałe w grudniu 2005 r uruchomiło masy ziemne, których objętość oszacowano na ok. 3,5 mln m³.



Rys. 1.1. Osuwisko 22S na zboczu południowym odkrywki w KWB Bełchatów

Fig. 1.1. Landslide 22S on the southern slope of the open cast mine in the Lignite Mine Bełchatów

Do tej pory do monitorowania stateczności zboczy wykorzystywano metody fotogrametryczne (Gawin 2004; Mularz 2001; Sitek Z.1974) lub klasyczne (pomiar tachimeryczny wykonywany na przypadkowo rozmieszczone przyzmaty, które z reguły przeznaczono „na straty”). Obydwie metody posiadają pewne wady polegające na ograniczeniu ich stosowania w pogorszonych warunkach atmosferycznych (mgła, zmrok lub zaciemnienie, cienie rzucane przez skarpy), znacząco mniejsza ilość pozyskiwanych danych oraz o wiele większa liczba prac kameralnych. Prowadzone wcześniej badania (Maciaszek, Gawałkiewicz 2003; Gawałkiewicz 2007) wskazały na skuteczność stosowania skanerów laserowych w pomiarach o podobnym charakterze.

Powyższe czynniki wykazały potrzebę i celowość podjęcia badań dotyczących oceny możliwości i zakresu wykorzystania skanowania laserowego dla śledzenia rozwoju procesów osuwiskowych w warunkach dużej kopalni odkrywkowej. Pole testowe stanowił fragment południowego zbocza KWK Bełchatów z dużą strukturą osuwiskową 22S (Rys. 1.1). Do badań skanerowych wybrano niekorzystny obiekt, ze względu na ciemną powierzchnię poddaną skanowaniu i utrudnione warunki panujące w tak głębokiej odkrywce. Pomiar został przeprowadzony w listopadzie 2007 r, miał na celu dostarczenie informacji, czy możliwe będzie wykorzystanie skanera do pomiaru tak ciemnej i skomplikowanej powierzchni jaką jest nieregularna powierzchnia osuwającego się węgla brunatnego.

2. Prace polowe

Jako założenie do przeprowadzenia eksperymentu przyjęto wykonanie pomiaru osuwiska 22S skanerem laserowym tak, aby objąć cały jego obszar. Skanowanie za pomocą skanera ILRIS 3D (gwarantowany przez producenta zasięg pomiaru to 1500m) kanadyjskiej firmy Optech (Rys. 2.1.) wykonano z jednego stanowiska otrzymując 5 607 225 punktów pomiarowych.

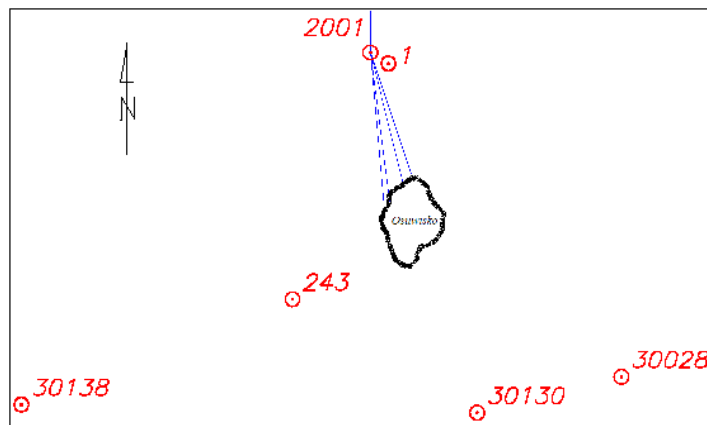
Drugą częścią zadania, wykonywaną równocześnie z pomiarem skanerem laserowym, był pomiar profili kontrolnych na osuwisku przy pomocy tachimetru bezzwierciadlanego Topcon

GPT – 7505 (gwarantowany przez producenta zasięg bezzwierciadlany to 2000m). Profile te miały posłużyć do kontroli poprawności wykonania pomiaru skanerem laserowym.

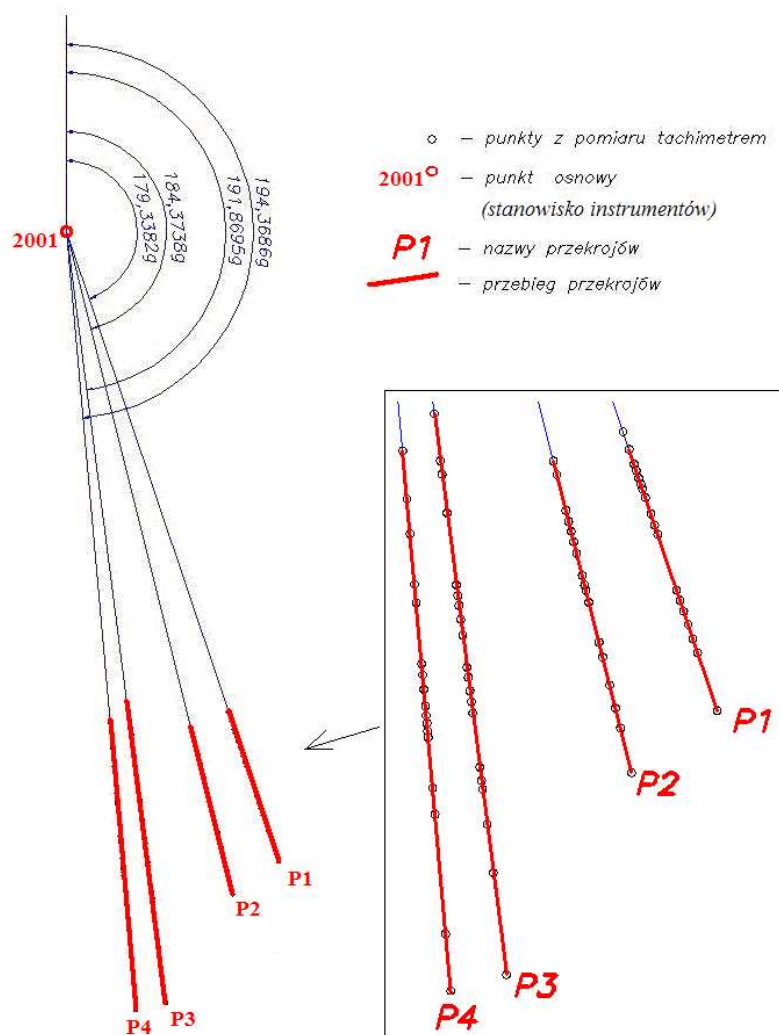


Rys. 2.1. Skaner ILRIS 3D podczas skanowania osuwiska
Fig. 2.1. Scanner ILRIS 3D during the scanning of the landslide

W wyniku pomiaru otrzymano 71 punktów kontrolnych na 4 profilach (P1, P2, P3, P4). Należy zaznaczyć, że nie udało się wykonać pomiaru profili w całości. Część punktów ze względu na brak odbicia sygnału od powierzchni osuwiska nie została pomierzona. Wszystkie pomiary nawiązano do układu współrzędnych wykorzystywanego przez KWB „Bełchatów”. Pomiar wykonany skanerem został nawiązany do osnowy lokalnej przy pomocy tarcz celowniczych (tzw. „target”), których położenie zostało wyznaczone tachymetrycznie z punktu 2001. Współrzędne tego punktu wyznaczone na podstawie wcięcia wstecz do punktów 243, 30028, 30130 i 30138. Profile kontrolne także pomierzono z punktu 2001 (Rys. 2.2. i Rys. 2.3.).



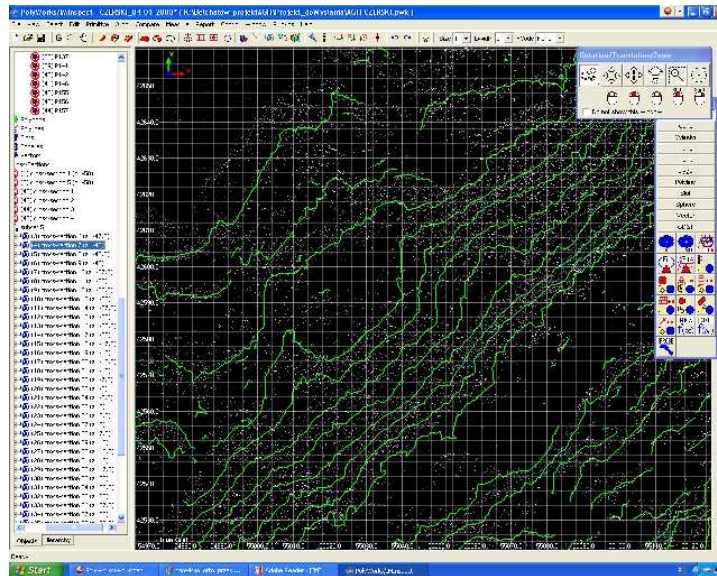
Rys. 2.2. Szkic osnowy wykorzystanej w pomiarach skanerowych i kontrolnych.
Fig. 2.2. The sketch of the control line applied in the scanning and control measurements



Rys. 2.3. Szkic rozmieszczenia przekrojów kontrolnych.
Fig. 2.3. The sketch of the distribution of control sections

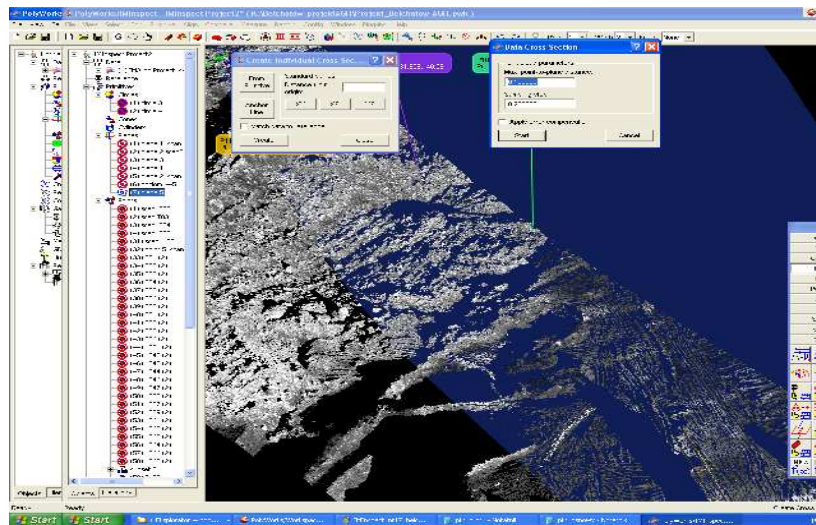
3. Prace kameralne

W ramach prac kameralnych wykonano szereg procedur mających na celu uzyskanie obrazu osuwiska w lokalnym układzie współrzędnych. Pierwszym etapem tych prac były obliczenia z pomiarów klasycznych. Obliczono współrzędne tarcz celowniczych i punktów na przekrojach. Drugim etapem prac było wpasowanie tzw. „chmury punktów” we współrzędne tarcz celowniczych. Tak skalibrowany model posłużył do stworzenia mapy warstwicznej osuwiska (Rys. 3.1.) oraz wygenerowania przekrojów do porównania z pomiarem klasycznym (Rys 3.2.). Wszystkie prace nad danymi pozyskanymi ze skanowania laserowego wykonano w dostosowanym do skanera ILRIS 3D oprogramowaniu PolyWorks (Rys. 3.1. i Rys 3.2.).



Rys. 3.1. Mapa warstwowa osuwiska wykonana na podstawie „chmury punktów” w programie PolyWorks

Fig. 3.1. Contour map of the landslide based on the „cloud of points” in the PolyWorks program



Rys. 3.2. Tworzenie przekrojów w programie PolyWorks

Fig. 3.2. The sketch of the distribution of control sections

4. Ocena dokładności pomiaru tachymetrycznego

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów (do punktów 30138, 243, 30130 i 30028 – Rys 2.3) i obliczeń dla stanowiska 2001, ocenić możemy dokładność określenia jego współrzędnych na : $m_{xy-0} = \pm 0,044$ m, $m_{z-0} = \pm 0,074$ m (współrzędne wcięcia wstecz

obliczono przy użyciu programu GEONET). Na dokładność wyznaczenia współrzędnych punktu 2001 wpływ miało kilka czynników. Jako najważniejsze należy wymienić wpływ refrakcji, zamglenie i wibrację powietrza. Trzy punkty nawiązania znajdowała się na powierzchni odkrywki, a wcinany punkt w jej wnętrzu co przy długościach celowych od 1200 m do 2200 m i przewyższeniach dochodzących do 230 m miało znaczący wpływ na wyznaczenie współrzędnych. Wyznaczenie dokładności pomiaru tachimetrycznego punktów osuwiska jest trudnym zadaniem. Podawana przez producenta instrumentu Topcon GPT – 7505 dokładność pomiaru kątów to $m_{\alpha} = 15''$ a odległości to $m_d = 18$ mm (przy pomiarze bezzwierciadlanym dla długości celowych w przedziale od 400 do 750m) pozwala wyznaczyć błąd wyznaczenia współrzędnych poziomych $m_{xy-t0} = 0,024$ m i wysokościowych $m_{z-t0} = 0,018$ m.

Biorąc pod uwagę dokładność wyznaczenia współrzędnych stanowiska należy spodziewać się błędów położenia pikiet (punktów na przekrojach i tarcz celowniczych)

$$m_{xy-t} = \sqrt{m_{xy0}^2 + m_{xy-t0}^2} = \pm 0,050 \text{ m}, \quad m_{z-t} = \sqrt{m_{z0}^2 + m_{z-t0}^2} = \pm 0,076 \text{ m}$$

($m_{xyz-t} = \sqrt{m_{xy-t}^2 + m_{z-t}^2} = \pm 0,091$ m). Trudno jednoznacznie stwierdzić czy w przypadku

pomiaru punktów na przekrojach udało się osiągnąć obliczone wartości błędów. Należy wziąć pod uwagę to, że celowanie bezpośrednio do powierzchni fizycznej osuwiska, która nie jest płaska i prostopadła do padającej wiązki lasera, generuje dodatkowe błędy.

5. Próba określenia dokładności pomiaru skanerowego

Określenie dokładności wyznaczenia współrzędnych punktów mierzonych skanerem laserowym możliwe jest w bardzo dużym przybliżeniu. Producent użytego instrumentu nie podaje bowiem dokładności pomiaru dla celowych powyżej 100 m. Dla odległości do 100 metrów, przy założeniu bezbłędności punktów osnowy, błąd wyznaczenia współrzędnych punktu wynosi $m_{xyz} = \pm 0,008$ m. Odległości skanowania w omawianym przypadku wynosiły od 350 m do 1000 m dlatego do dalszych analiz przyjęto błąd wyznaczenia współrzędnych wynoszący $m_{xyz0} = \pm 0,020$ m. Biorąc pod uwagę dokładność wyznaczenia współrzędnych tarcz celowniczych i błąd wyznaczenia współrzędnych przy pomocy skanera można oszacować błąd

wyznaczenia współrzędnych na osuwisku jako $m_{xyz-s} = \sqrt{m_{xyz0}^2 + m_{xyz-t}^2} = \pm 0,093$ m. Do

dalszych analiz potrzebne było określenie błędu współrzędnej wysokościowej, dlatego obliczono błąd pojedynczej współrzędnej przy założeniu: $m_{x-s} = m_{y-s} = m_{z-s}$, stosując

wzór: $m_{xyz-s} = \sqrt{m_x^2 + m_y^2 + m_z^2}$ otrzymujemy: $m_{x-s} = m_{y-s} = m_{z-s} = 0,054$ m.

6. Wyniki otrzymane z porównania profili pomiarowych

Różnica wysokości pomiędzy odpowiadającymi sobie punktami na profilach zawiera w sobie błędy: osnowy, tachimetru i błąd skanera laserowego. Na podstawie powyższych analiz określono błąd wyznaczenia różnicy wysokości pomiędzy obiema metodami pomiarowymi

obliczony ze wzoru $m_{z-ts} = \sqrt{m_{z-t}^2 + m_{z-s}^2} = \pm 0,093$ m. Wartość tego błędu posłużyła do porównania z wynikami uzyskanymi w pomiarze terenowym. W wyniku pomiaru

tachimetrycznego uzyskano współrzędne przestrzenne 71 punktów na 4 profilach. Punkty te porównano z odpowiadającymi im punktami na profilach wygenerowanych z pomiaru skanerem laserowym (Tab. 6.1., Tab. 6.2., Tab. 6.3., Tab. 6.4.). Na rysunku 6.1. przedstawiono jako przykład profil 1 jaki uzyskano na podstawie pomiarów. Maksymalna różnica wysokości punktów wystąpiła na punkcie 22 (profil 1, Rys. 6.1.) i wynosiła $d_{22} = z_{22-t} - z_{22-s} = -0,514$ m, a średnia różnica wysokości pomiędzy pomiarami to $d_{sr} = 0,063$ m. Średni błąd różnicy wysokości z obydwu metod pomiaru obliczono ze wzoru

$$m'_{z-ts} = \sqrt{\frac{(d_i - d_{sr})^2}{n-1}} = \pm 0,114 \text{ m}.$$

Błąd m'_{z-ts} obliczony na podstawie danych

pozyskanych w terenie jest nieznacznie większy do błędu m_{z-ts} obliczonego w teoretycznych rozważaniach. W procedurach obliczeniowych nie brano pod uwagę wpływu powierzchni odbijającej na jakość pomiaru odległości. Warto także dodać, że skaner laserowy zadowalająco dobrze poradził sobie z pomiarem do ciemnej powierzchni węgla, a także z dużym zamgleniem jakie panowało w dniu pomiaru. Należy także dodać, że rozmieszczenie punktów osnowy skaningowej (płaskie tarcze z odpowiednim nadrukiem) było możliwe tylko w obszarze przed osuwiskiem i wynikało z ograniczeń w ruchu na terenie kopalni. Mogło sprawić, że punkty obiektu opracowania znajdujące się za tarczami celowniczymi miały większe błędy położenia względem obliczonych.

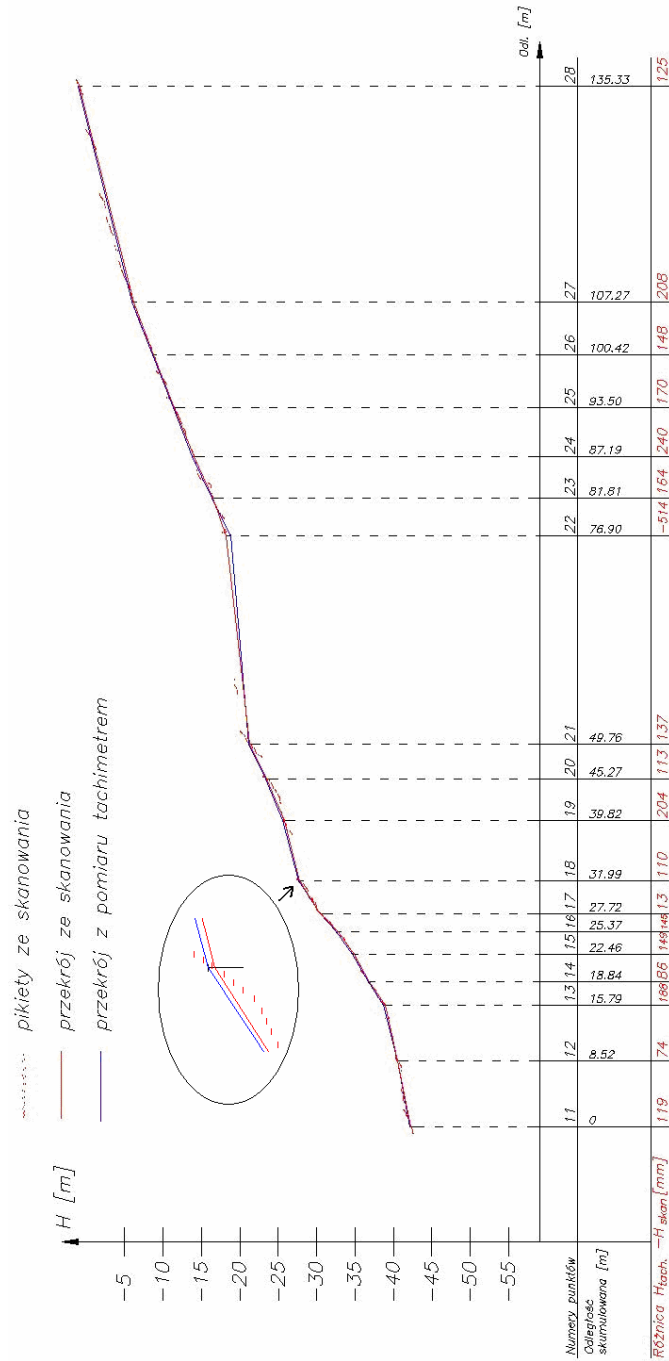
7. Podsumowanie

Prędkość i duża precyzja skanerowej metody monitorowania osuwisk, to nie jedyne jej zalety. Pomiary z dużej odległości (celowe do 1500m) są bezpieczne nawet przy czynnym osuwisku. Skanowanie nie wymaga stabilizacji na osuwisku reflektorów, ani dodatkowych, pomocniczych materiałów. Zapewnia ono:

- prędkość i efektywność pracy;
- oszczędność i ograniczenie czasu w terenie do minimum oraz łatwość wykonania prac kameralnych;
- wysoką (jak na tak trudne warunki pomiarowe) dokładność pomiaru rzeźby terenu (do kilkunastu cm);
- jako wynik otrzymujemy model powierzchni terenu, który można przetwarzać na wiele sposobów (np. do określenia objętości przemieszczających się mas ziemnych);
- bardzo szybki i łatwy dostęp do danych w czasie rzeczywistym ;
- łatwość pracy i obróbki skanowanych obiektów dzięki specjalistycznemu oprogramowaniu (w tym wypadku program PolyWorks).

Przy tak dużym obiekcie, jakim jest największa w Polsce odkrywka wyniki uzyskane ze skanowania laserowego ocenia się na bardzo dobre, konkurencyjne dla metod klasycznych i fotogrametrycznych pod względem dokładności. Dodatkowo wartym zauważenia jest możliwość uniezależnienia się od warunków związanych z oświetleniem i przejrzystością powietrza.

W przypadku okresowych pomiarów tego samego osuwiska istnieje możliwość wykonania szerokich analiz związanych z przemieszczaniem się mas ziemnych (obliczanie objętości, porównywanie przekrojów pomiędzy seriami pomiarowymi itp.).



Rys. 6.1. Profil P1
Fig. 6.1. Control section P1

Tabela 6.1. Wyniki z przekroju P1

Table 6.1. Results from section P1

Nr punktu	X	Y	Z _t	Z _s	d = Z _t - Z _s
	[m]				[mm]
11	55124,198	42689,428	-42,190	-42,309	119
12	55126,917	42681,350	-40,505	-40,579	74
13	55129,234	42674,459	-38,734	-38,922	188
14	55130,204	42671,576	-36,715	-36,801	86
15	55131,361	42668,142	-34,694	-34,843	149
16	55132,288	42665,386	-32,624	-32,769	145
17	55133,038	42663,158	-30,493	-30,506	13
18	55134,400	42659,109	-27,668	-27,778	110
19	55136,897	42651,684	-25,567	-25,771	204
20	55138,634	42646,521	-23,375	-23,488	113
21	55140,065	42642,267	-21,133	-21,270	137
22	55148,722	42616,543	-18,786	-18,272	-514
23	55150,286	42611,894	-16,357	-16,521	164
24	55152,004	42606,787	-13,851	-14,091	240
25	55154,013	42600,812	-11,297	-11,467	170
26	55156,222	42594,246	-8,674	-8,822	148
27	55158,406	42587,755	-5,967	-6,175	208
28	55167,353	42561,162	1,000	0,875	125

Tabela 6.2. Wyniki z przekroju P2

Table 6.2. Results from section P2

Nr punktu	X	Y	Z _t	Z _s	d = Z _t - Z _s
	[m]				[mm]
29	55092,179	42675,946	-45,162	-45,247	84
30	55093,749	42669,676	-43,384	-43,442	58
31	55097,864	42653,253	-41,383	-41,482	99
32	55099,125	42648,222	-39,417	-39,551	134
33	55100,286	42643,591	-37,396	-37,471	75
34	55101,481	42638,819	-35,351	-35,435	84
35	55102,825	42633,463	-33,230	-33,378	148
36	55105,365	42623,317	-28,898	-28,845	-53
37	55106,454	42618,917	-26,653	-26,759	106
38	55107,072	42616,450	-24,346	-24,647	301
39	55108,451	42610,938	-21,977	-22,079	102
40	55113,042	42592,612	-19,615	-19,760	145
41	55114,764	42585,745	-17,085	-17,171	86
42	55117,988	42572,879	-13,601	-13,770	169
43	55120,636	42562,315	-10,874	-10,803	-71
44	55122,935	42553,141	-8,044	-8,167	123
45	55128,073	42532,638	-2,085	-2,206	121

Tabela 6.3. Wyniki z przekroju P3
Table 6.3. Results from section P3

Nr punktu	X	Y	Z _t	Z _s	d = Z _t - Z _s
	[m]				[mm]
46	55037,431	42697,752	-49,066	-49,071	5
47	55040,212	42676,093	-48,608	-48,622	14
48	55041,014	42669,845	-46,986	-46,963	-23
49	55043,289	42652,126	-45,964	-46,018	54
50	55047,540	42619,007	-43,309	-43,341	32
51	55048,185	42614,012	-41,217	-41,261	44
52	55048,769	42609,467	-39,088	-39,102	14
53	55049,588	42603,084	-36,978	-36,944	-34
54	55050,514	42595,883	-34,821	-34,871	50
55	55052,417	42581,068	-32,786	-32,829	43
56	55053,009	42576,446	-30,418	-30,426	8
57	55053,811	42570,211	-28,011	-28,041	30
58	55054,449	42565,255	-25,534	-25,660	126
59	55055,118	42560,034	-23,027	-23,070	43
60	55058,306	42535,205	-20,488	-20,445	-43
61	55059,110	42528,958	-17,783	-17,741	-42
62	55059,620	42524,986	-15,034	-15,069	35
63	55061,681	42508,935	-12,102	-12,066	-36
64	55064,562	42486,487	-8,873	-8,840	-33
65	55070,571	42439,706	-4,929	-4,755	-174

Tabela 6.4. Wyniki z przekroju P4
Table 6.4. Results from section P4

Nr punktu	X	Y	Z _t	Z _s	d = Z _t - Z _s
	[m]				[mm]
66	55022,918	42680,614	-48,849	-48,946	97
67	55024,882	42658,467	-48,285	-48,222	-63
68	55026,298	42642,519	-46,076	-46,347	271
69	55028,359	42619,277	-43,944	-43,997	53
70	55029,113	42610,793	-42,044	-42,113	69
71	55031,608	42582,661	-40,061	-40,081	20
72	55032,06	42577,580	-37,788	-37,831	43
73	55032,651	42570,917	-35,504	-35,504	0
74	55033,329	42563,252	-33,189	-33,163	-26
75	55033,718	42558,887	-30,758	-30,742	-16
76	55034,035	42555,305	-28,217	-28,249	32
77	55034,357	42551,685	-25,671	-25,728	57
78	55034,609	42548,838	-23,074	-23,365	291
79	55036,667	42525,617	-20,524	-20,594	70
80	55037,745	42513,478	-17,747	-17,733	-14
81	55042,632	42458,423	-11,477	-11,386	-91

Literatura

- [1] Gawałkiewicz R, 2007: Metodyka pomiaru i obróbki danych skaningowych w procesie modelowania na przykładzie inwentaryzacji zabytkowego Kopca Krakusa, Przegląd Budowlany – Miesięcznik Polskiego Związku Inżynierów i Techników Budownictwa, str. 60-68, Warszawa
- [2] Gawin A.: Ocena możliwości zastosowania fotogrametrii cyfrowej do inwentaryzacji stanu robót górniczych w KWB Bełchatów. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, vol. 14, Białobrzegi – Warszawa 2004;
- [3] Gawin A.: Technologia fotogrametrycznej inwentaryzacji stanu robót górniczych w kopalni odkrywkowej na przykładzie KWB „Bełchatów”. Katalog wystawców X międzynarodowych targów GEA - materiały szkoleniowe, Kraków 2004;
- [4] Maciaszek J., Gawałkiewicz R.,: „Przyrządy laserowe na usługach geodezji górniczej”, Wyższy Urząd Górniczy, nr 4/2003, Katowice 2003r.
- [5] Mularz S.: Teledetekcyjny monitoring środowiska kopalń odkrywkowych. Nowoczesne technologie w geodezji i inżynierii środowiska: Konferencja naukowa z okazji jubileuszu 50-lecia Wydziału Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Kraków 2001;
- [6] Sitek Z.: Poradnik górnika . Wydawnictwo „Śląsk”. Katowice 1974r. 1209-1261.

Laser scanning application for monitoring landslides and dislocations in open cast mines – the Bełchatów Lignite Mine example

Key words

laser scanning, landslides, open cast mines

Abstract

The deformations of the slopes in open cast mines make an extraordinarily important problem both from the point of view of the safety of the exploitation as well as for the project practice. The applied so far classical geodetic and photogrammetric measurements allow a narrow range of defining the scale of horizontal and vertical dislocations of points. New measuring technologies allow the measurements and analysis of much larger number of points obtained in a long time scale. The article presents the application of laser scanning for the needs of the monitoring of dislocations in slopes and landslides in open cast mines. As an example a large landslide in the area of the Lignite Mine „Bełchatów” was used.

Przekazano: 19 marca 2010 r.