

Zastosowanie technologii skanowania laserowego do monitorowania deformacji podszycia szybu w LW „Bogdanka” SA

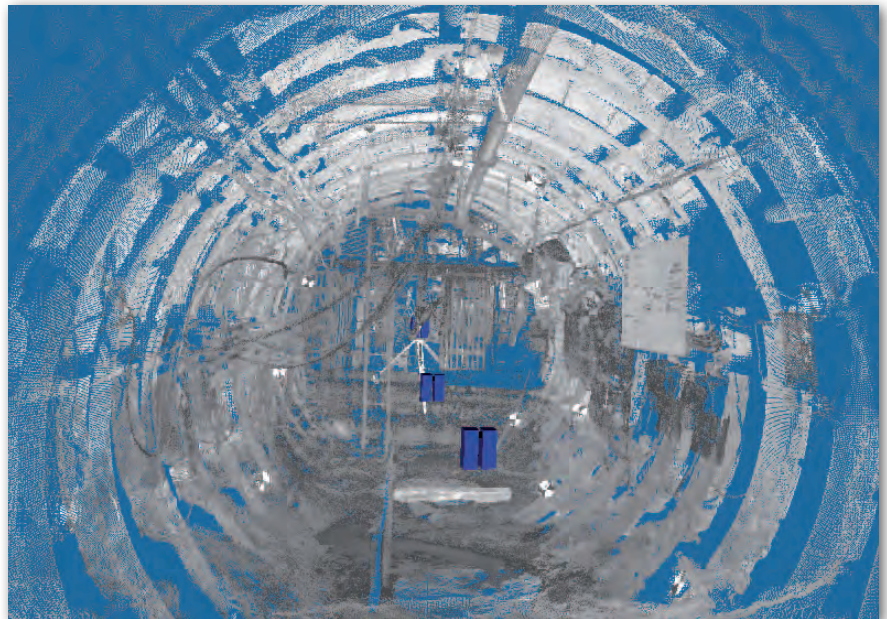
# PILOTAŻ W KOPALNI

Wydaje mi się, że kopalnie będą wkrótce miejscem szerszego wykorzystania skanowania. Firma Zoller+Fröhlich stworzyła skaner Imager 5006 EX, który ma specjalne atesty antywybuchowe dopuszczające ten instrument do pracy w wyrobiskach pod ziemią – powiedział w wywiadzie dla *GEODETY* prof. Rudolf Staiger, wiceprezydent FIG. Minął zaledwie rok, a rozmówca profesora Artur Adamek nie tylko uczestniczył w tym czasie w takich pomiarach w kopalni, ale również ma swój udział w napisaniu poniższego artykułu.

ARTUR ADAMEK,  
JAROSŁAW BAŁCHAN,  
KRZYSZTOF BRATUŚ,  
JACEK KRAWIEC

**T**rudne warunki panujące w kopalniach determinują dobór specjalistycznego sprzętu oraz odpowiednich technik pomiarowych. Instrumenty geodezyjne pracujące pod ziemią powinny charakteryzować się wysoką precyzją i dokładnością uzyskiwanych wyników. Dodatkowym atutem jest duża liczba obserwacji zrealizowanych w jak najkrótszym czasie. Do takich urządzeń pomiarowych można zaliczyć naziemne skanery laserowe, dla których kopalniane korytarze i szyby stają się nowym środowiskiem pracy (rys. 1).

Można powiedzieć, że profesor Rudolf Staiger przewidział rozwój technologii skanowania w kopalniach. Podczas pilotażowego pomiaru w kopalni



Rys. 1. Rozmieszczenie stanowisk skanera w podszyciu reprezentowanym przez chmurę punktów

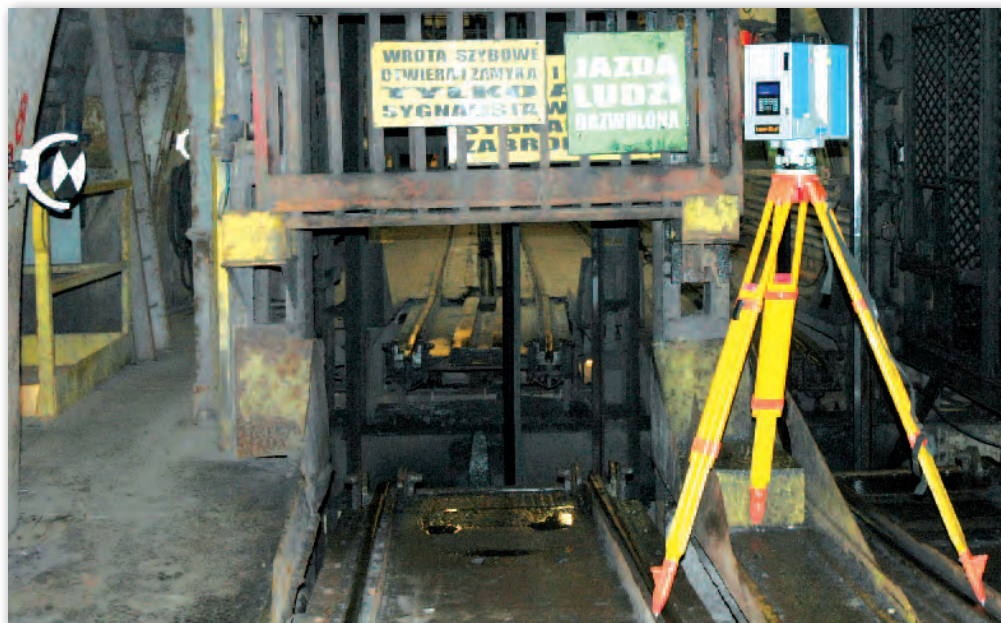
LW „Bogdanka” – ze względu na specyfikę warunków tam panujących – nie było jednak konieczności stosowania specjalnego modelu skanera. Instrument do prac powierzchniowych spełniał warunki techniczne stawiane przez kopalnię. Do skanowania w podszyciach szybów użyto modelu Imager 5006i firmy Z+F (rys. 2). Z pewnością pomiary w Bogdance nie są pierwszymi tego typu pracami zrealizowanymi w kraju, jednak na razie brakuje widocznych liderów kopalnianych wdrożeń skaningu w Polsce.

#### • CEL POMIARU

Okresowo wykonywane pomiary kontrolne na terenie kopalni realizowane w ramach geodezyjnego monitorowania elementów konstrukcyjnych muszą dostarczać informacji o stanie technicznym

tych elementów oraz o ewentualnych zagrożeniach wynikających z przekroczenia dopuszczalnych norm. Ze względu na różnorodność zjawisk zachodzących pod ziemią klasyczne pomiary przymiary i deformacji nie są w stanie wygenerować odpowiedniej ilości materiału obserwacyjnego potrzebnego do kompleksowych analiz. Również skala tych zjawisk przemawia za zastosowaniem technologii skanowania laserowego.

Brak doświadczeń w tym zakresie był impulsem do przeprowadzenia w podszyciach w LW „Bogdanka” praktycznej weryfikacji oraz zbadania przydatności tej technologii do zadań określonych przez specjalistów z różnych działów kopalni. Szeroki wachlarz aplikacyjnych możliwości skanowania laserowego zo-



Rys. 2. Skaner Z+F Imager 5006i w trakcie pomiaru pod ziemią

stał w pełni wykorzystany i przetestowany, a wynikowy materiał pomiarowy posłużył do szczegółowych opracowań.

## • TECHNOLOGIA SKANOWANIA LASEROWEGO

Mimo iż początki skanowania laserowego sięgają lat 90., technologia wciąż jest nowa i dla wielu nieznana. Ogólne zasady działania skanera laserowego są proste, bo oparte na pomiarach tachymetrycznych i fotogrametrii bliskiego zasięgu. Skaner wyznacza współrzędne przestrzenne (X, Y, Z) mierzonych punktów, określając odległości i kąty. Najnowsze modele skanerów fazowych mierzą już z prędkością miliona punktów na sekundę, a zasięg ich pomiaru wynosi blisko 200 metrów. Urządzenie rejestruje również tzw. czwartą współrzędną, tzn. siłę odbicia powracającego sygnału świetlnego wysłanego przez skaner. Dane zawarte w tej składowej dostarczają dodatkowych informacji o mierzonym obiekcie (możliwość wyodrębnienia rodzajów skanowanych materiałów, wykrycia ewentualnych wycieków w ścianach, wyselekcjonowanie na zeskanowanym obiekcie informacji w zdefiniowanym przez użytkownika zakresie odbicia itp.).

Ogólny kierunek rozwoju skanerów to zwiększanie prędkości i zasięgu przy jednoczesnym utrzymaniu uzyskiwanych dokładności. Skanery impulsowe w przyszłości mają być również szybkie jak fazowe, a fazy będą mierzyć tak daleko jak impulsowe. Taki trend pozwała oczekiwać w niedalekiej przyszłości instrumentów uniwersalnych, zbiera-

jących obserwacje z jeszcze wyższą dokładnością i precyzją.

Skanowanie laserowe jest dzisiaj najszybszą technologią pozyskiwania danych quasi-obrazowych i quasi-ciągłych. Otrzymywane modele przestrzenne w postaci chmur punktów charakteryzują się nie tylko kompleksowością zawartych informacji, ale również wiernością odwzorowania mierzonego obiektu. Wiąże się to z olbrzymią ilością danych o objętości rzędu gigabajtów lub nawet terabajtów. Dane te niosą ze sobą zupełnie nową jakość informacji, której najważniejszym wyróżnikiem jest brak subiektywizmu.



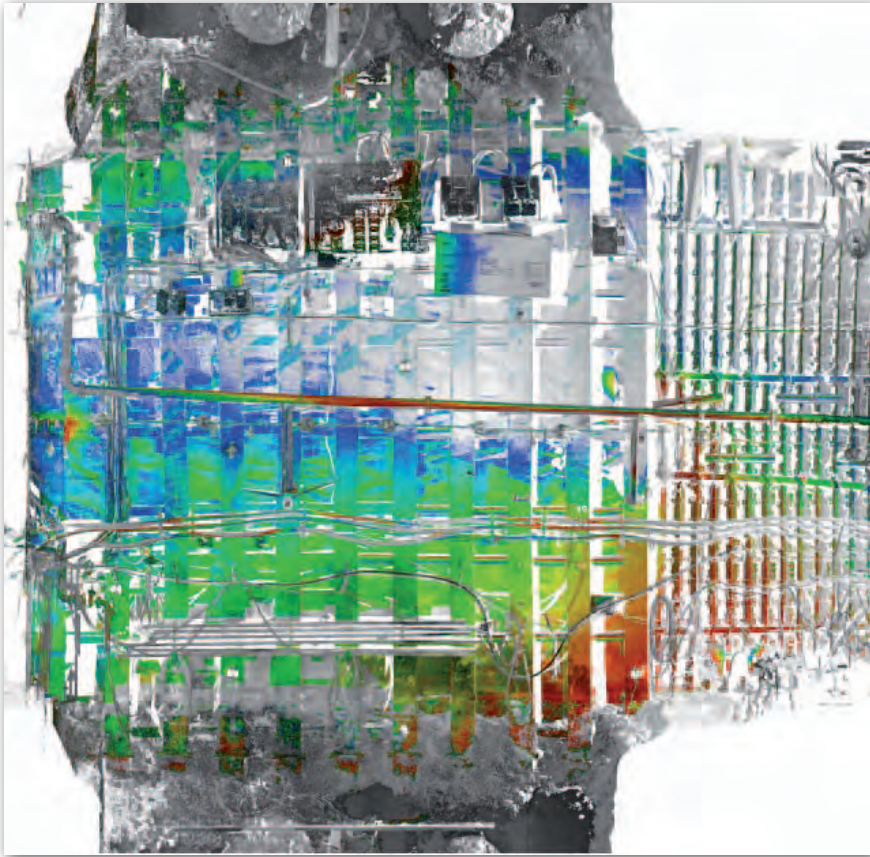
Rys. 3. Widok punktu wiążącego (nr 1002) oraz punktu kontrolnego (nr 1) wraz z firmową tarczą Z+F gwarantującą wysoką precyzję wyznaczenia jej centra

## • METODYKA POMIARU

Sam proces skanowania pod ziemią nie różni się znacząco od tego, który realizujemy na powierzchni. Specyfika środowiska i panujące w kopalni warunki wymuszają jednak zastosowanie dodatkowych procedur i technik pomiarowych w celu utrzymania wysokich dokładności. Niezmienna pozostaje konieczność rozmieszczenia na obiekcie punktów, które powiążą ze sobą skany wykonane z sąsiednich stanowisk (rys. 3). Zależnie od przeznaczenia i rodzaju danego pomiaru stabilizowana jest (bądź nie) sieć punktów kontrolnych. Jeśli wyniki przemieszczeń mają być

rozpatrywane globalnie, to model przestrzenny należy przetransformować do zewnętrznego układu współrzędnych, który będzie bazą odniesienia dla tego typu analiz.

Rozpoczynając prace terenowe, należy zdefiniować, co ma być produktem końcowym opracowania, jakie informacje nas interesują i jakich dokładności oczekujemy. Te właśnie czynniki wpływają na metodykę pracy. Jeśli celem skanowania jest wyznaczenie deformacji elementów mierzzonego obiektu, to niezbędne jest stworzenie takiej bazy punktów odniesienia, która zapewni jednoznaczne jej odtworzenie i wpasowa-



Rys. 4. Rozwinięcie fragmentu podszycia na pobocznicy walca - mapa hipsometryczna rozkładu deformacji

nie pomiaru kontrolnego w wyjściowy. Lokalizacja i rozmieszczenie punktów wpasowania należą do najistotniejszych czynności, które należy wykonać z dużą uwagą oraz wyobraźnią, tak by przy minimalnej liczbie stanowisk skanera zapewnić maksymalne pokrycie obszaru danymi pomiarowymi. Każdy skan daje kompletne pokrycie punktami całego otoczenia stanowiska, jednak ze względu na istnienie wielu przeszkód zmniejszających widoczność wielokrotnie zachodzi potrzeba zwiększenia liczby skanów wykonanych na danym obiekcie.

Pilotażowy pomiar podszycia w kopalni LW „Bogdanka” został przeprowadzony w dwóch epokach pomiarowych oddalonych od siebie o ponad 3 miesiące. W pierwszej epoce wykonano 10 skanów, natomiast w drugiej – ze względu na przebudowę chodnika i umieszczenie pomostu – o 3 skany więcej. W trakcie obu pomiarów korzystano z technologii dostarczonej przez firmę Z+F, w tym: skanera Imager 5006i oraz tarcz w postaci obracanych „szachownic” służących do orientacji skanów. Współrzędne przestrzenne tarcz wyznaczono za pomocą pomiarów tachymetrycznych instrumentem Leica TCRP 1201+. Taki

zestaw pomiarowy oraz odpowiednio dobrana metodyka prowadzenia pomiarów geodezyjnych gwarantują pewność i precyzję oraz dokładność wykonanych obserwacji.

Ponieważ skaning cechuje pozyskiwanie bardzo dużej ilości danych, które kolejno poddawane są procesom filtracji i orientacji oraz dalszej obróbce, to – w zależności od charakteru obiektu oraz końcowej postaci opracowania – określana jest ilość danych, które będą przetwarzane. Niewykorzystane chmury punktów lub ich wybrane fragmenty mogą być archiwizowane i użyte później do innych zastosowań, bez potrzeby powtórzenia pomiarów. Surowe skany stają się wierną inwentaryzacją stanu obiektu na moment, w którym wykonano pomiar.

#### ● OPRAWOWANIE WYNIKÓW

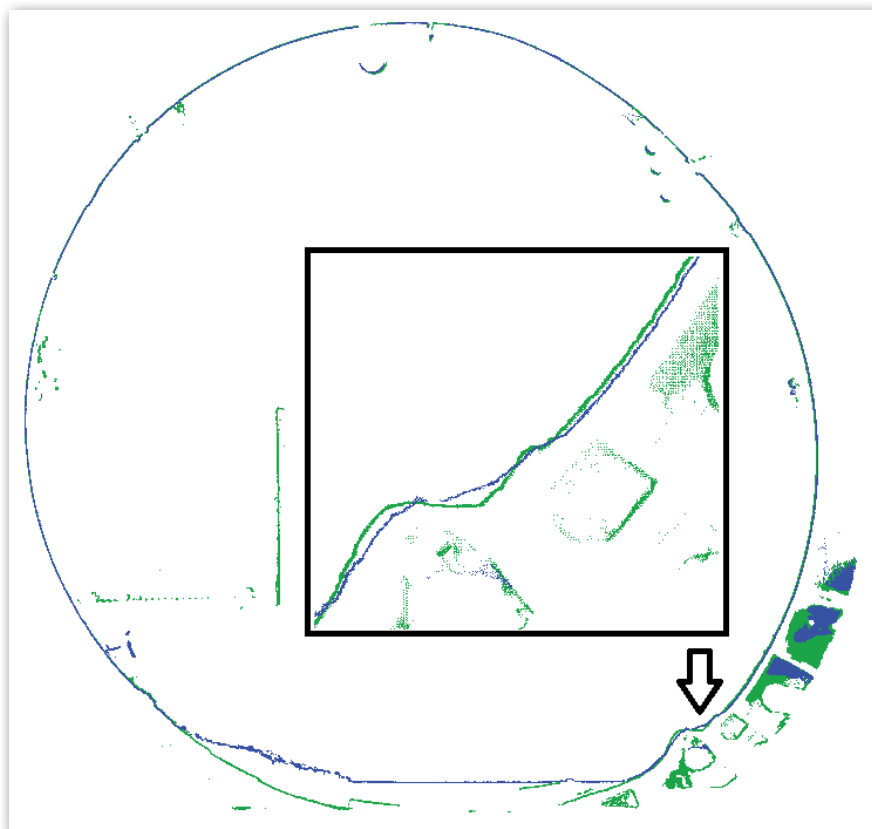
Uzyskane z pomiaru chmury punktów poddawane są dalszej obróbce w celu określenia ich wzajemnej orientacji, a następnie geometrii skanowanych obiektów, której wynikiem są analizy położenia tych obiektów w odniesieniu do stanu wyjściowego. Zastosowanie specjalistycznych narzędzi graficznych, opartych na zaawansowanych algorytmach

obliczeniowych, pozwala na zmianę modeli punktowych na czytelne postacie geometryczne. Te z kolei oddają w pełni charakter i formę inwentaryzowanych budowli, ułatwiając prawidłową interpretację danych oraz zjawisk im towarzyszących i oddziałujących na nie bezpośrednio lub pośrednio.

Prace kameralne związane z opracowaniem skanów, jak również z określeniem miejsc deformacji ścian korytarza i szybu, zostały wykonane w programie firmowym Z+F LaserControl oraz autorskim programie ASCAN firmy ASTRA-GIS. Etapem niezbędnym jest wykonanie obliczenia orientacji skanów (potocznie „rejestracja skanów”). W procesie tym na podstawie pomierzonych obserwacji wykonuje się wyrównanie ściśle metodą pośredniczącą z warunkiem minimalizacji kwadratu sumy obserwacji ( $[VV] = \text{minimum}$ ). Ponieważ istotnym wymogiem jest umożliwienie wykonania porównania „chmur punktów” z dwóch epok, należy przyjąć takie rozwiązanie, które nie spowoduje „deformacji” wyników obliczenia orientacji skanów z pierwszej i drugiej epoki przez czynniki zewnętrzne. Ważne również jest, aby obserwacje przetworzone w pierwszej epoce nie zaburzyły procesu obliczeniowego w epoce drugiej, zniekształcając wynik końcowy obliczeń.

Rejestracja skanów serii wyjściowej została wykonana z wykorzystaniem kilku „szachownic” o znanych współrzędnych przestrzennych oraz kilkuset obserwacji do wybranych punktów wiążących o nieznanymi do tej pory współrzędnych. Zadaniem punktów wiążących jest jak najlepsze wzajemne dopasowanie skanów z dokładnością poniżej 1 mm, natomiast zadaniem punktów kontrolnych jest wpasowanie układu skanów w osnowę kopalni (o ile taka potrzeba zachodzi). Oba te zadania realizowane są w jednoczesnym procesie obliczeniowym metodą kolejnych przybliżeń. Orientacja skanów jest reprezentowana przez współrzędne środka skanera oraz trzy kąty obrotu, które tworzą razem wektor przesunięcia oraz macierz obrotu. Obserwacjami są współrzędne tarcz lub punktów naturalnych w układzie lokalnym skanera. Punkty wiążące oraz kontrolne w trakcie wyrównania uzyskują nowe współrzędne, a skany – nowe elementy orientacji zewnętrznej.

Obliczenie orientacji skanów w drugiej epoce przebiega odmiennie. Ponieważ deformacja może wystąpić również na punktach kontrolnych, to wspólne



Rys. 5. Widok analizy przekrojów pionowych wykonanych w korytarzu podszybia. Kolorem niebieskim oznaczono pierwszą epokę pomiarową, kolorem zielonym pomiar kontrolny

obliczenie obu epok nie jest możliwe. Przyjętym rozwiązaniem jest pomiar tych samych punktów występujących w obu seriach oraz pomiar punktów występujących tylko w jednej z nich. Punkty, które jako wiążące w pierwszym obliczeniu uzyskują współrzędne, stają się punktami kontrolnymi w epoce drugiej. Przy czym świadomie zwiększono im błędy współrzędnych, tak aby nie deformowały obliczeń z drugiej epoki. Istotne jest nadanie odpowiednich wag współrzędnym – znacznie większych niż błędom obserwacji. Obliczenia drugiej epoki pozwalają na wpasowanie drugiej chmury w pierwszą jako dwóch niezależnych, sztywnych brył. Przyjęta metoda może mieć tendencję do „ukrywania” mniejszych deformacji, jednak daje pewność, że otrzymane wartości są maksymalne i nie różnią się od rzeczywistych. Możliwe jest również dalsze arbitralne wskazywanie punktów, które w obu epokach miałyby te same współrzędne, ale tylko w takim przypadku, gdy założymy, że punkty te nie podlegają deformacjom. Wówczas możliwe byłoby jeszcze większe uwypuklenie maksymalnych przesunięć.

Zaletą zastosowania skanowania laserowego w przypadku wyznaczania od-

kształceń jest dowolność podejścia do samego pomiaru. Kiluminutowy pomiar na stanowisku daje chmurę punktów wyznaczonych z dokładnością rzędu 1 mm. Ta kompletna cyfrowa „kopia” przestrzennej bryły obiektu pozwala wrócić do opracowania i wyłuskać ważne, interesujące nas informacje nawet po upływie czasu. Ta sama własność skaningu laserowego umożliwia również przedstawienie wyników pomiaru w bardziej kompletny i „ciągły” sposób. Moduł generowania ortoobrazów programu ASCAN pozwala stworzyć rozwinięcia, inne moduły tworzą rzuty oraz przekroje obrazujące sytuację na obiekcie, jak również zjawiska deformacji i odkształceń.

Rysunek 4 przedstawia rozwinięcie korytarza na pobocznicy walca wraz z hipsometrią obrazującą wielkość deformacji; kolor czerwony pokazuje największe wartości deformacji, a powierzchnia biała lub szara oznacza ich brak. Kolorem niebieskim oznaczono wartości zaniedbywane lub minimalne. Wykonano również serię przekrojów pionowych i poziomych podszybia i wlotu szybu wraz z porównaniem stanów: wyjściowego i kontrolnego – rys. 5.

## ● SKANOWANIE W KOPALNI SIĘ SPRAWDZIŁO

Dzięki zastosowaniu skanera możliwe było kompleksowe uchwycenie stanu obiektu w danym momencie. Instrument Z+F Imager 5006i spełnił swoją funkcję w pozyskaniu danych w warunkach kopalnianych. Obserwacje ze skaningu pozwoliły zweryfikować stan obiektu, a przeprowadzone analizy dostarczyły potrzebnych informacji, które przekazano specjalistom z różnych działów kopalni. Analiza zmian relacji geometrycznych między obiektami stanowi podstawę do określenia czynników i zagrożeń wpływających na mierzone obiekty.

Wykonanie pomiarów na wskazanym obiekcie pozwoliło na wychwylenie zalet i wad zastosowanej technologii w specyficznych warunkach, jakie panują 960 metrów pod ziemią. Zarówno wykorzystany w pomiarach sprzęt, jak również użyte do opracowania oprogramowanie pozostawia jeszcze spory zapas możliwości aplikacyjnych technologii skanowania laserowego. W trakcie postprocessingu wykorzystano nie tylko podstawowe funkcje, ale rozwinięto również bardziej zaawansowane aplikacje, które zostały stworzone specjalnie na potrzeby tego wdrożenia. Doświadczenia zebrane w niniejszym projekcie posłużą do wykonania kolejnych pomiarów kontrolnych monitorujących stan wybranych obiektów na terenie kopalni.

ARTUR ADAMEK, JAROSŁAW BAŁCHAN,  
KRZYSZTOF BRATUŚ, JACEK KRAWIEC

Projekt został zrealizowany przez konsorcjum firm: SKALA 3D, Laser-3d, ASTRAGIS przy współpracy z kopalnią Lubelski Węgiel „Bogdanka” S.A. Referat, na podstawie którego powstał artykuł, był prezentowany na konferencji XX Szkoła Eksploatacji Podziemnej, Kraków, 21-25 lutego 2011 r., i ukaże się w monografii „Geomatyka górnicza – praktyczne zastosowania”, Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków 2011

### Literatura

- [1] Adamek A., 2010: O naziemnym skanowaniu laserowym, wywiad z prof. Rudolfem Staigerem, GEODETA 5 (180);
- [2] Adamek A., 2010: Zastosowanie technologii naziemnego skaningu laserowego do określenia dynamiki lodowca Hansa na Spitsbergenie, GEODETA 2 (177);
- [3] GEODETA 2008: Skanery laserowe, Bezpłatny dodatek miesięcznika GEODETA, Warszawa, nr 4 (155).
- [4] Kampczyk A., Strach M.: Technika – laserowe skanowanie tunelu kolejowego, www.kow.com.pl/serwis-informacyjny/technika-laserowe-skanowanie-tunelu-kolejowego.