Mobilna Platforma Górnicza w drodze do inteligentnej kopalni

3D pod ziemią

Na palcach jednej ręki można policzyć polskie firmy, które z powodzeniem wykonują specjalistyczne pomiary 3D pod ziemią. Jest wśród nich SKALA 3D z Lublina, która swoją przygodę z kopalniami rozpoczęła w 2010 r. w pobliskiej „Bogdance".

Artur Adamek

Skaning laserowy wykorzystywany jest dzisiaj praktycznie w każdej branży związanej z szeroko pojętymi budowlami i obiektami. Technologia 3D towarzyszy nam na każdym kroku, a duże tempo rozwoju widoczne jest również w zakresie narzędzi do skanowania. Plecakowe, ręczne i „kieszonkowe" skanery czy ultralekkie urządzenia montowane na dronach to tylko wybrane przykłady pokazujące, jak szybko i w jakim kierunku podąża ta technologia. Są jednak miejsca, które wyraźnie bronią się przed ekspansją chmury punktów. To kopalnie głębinowe – górnicze wyrobiska zarówno poziome, jak i pionowe. Warunki, jakie w nich panują, stawiają poprzeczkę dla pomiarów bardzo wysoko. Firma SKALA 3D pierwsze badania deformacji podszybia z wykorzystaniem skanowania laserowego zrealizowała w 2010 r. w kopalni Lubelski Węgiel „Bogdanka" SA. Obecnie oferuje już zaawansowane technologie mobilnego skanowania szybów górniczych.

Szyby górnicze trudne do pomiaru

Szyby górnicze to podstawowe pionowe wyrobiska górnicze o zróżnicowanej długości (głębokości), kształcie, obudowie oraz uzbrojeniu. Z uwagi na różne funkcje, które muszą spełniać, są bardziej lub mniej zabudowane urządzeniami (dźwigary, prowadniki, liny, naczynia wyciągowe) związanymi z transportem materiałów, urobku i ludzi. Wykorzystywane są również do przesyłu wody, podsadzki, powietrza (rurociągi), energii i informacji (kable). Bez nich eksploatacja pokładów na większych głębokościach (nawet do 1200 metrów) nie byłaby możliwa. Dlatego tak ważne jest utrzymanie ich dobrego stanu technicznego. Stanu, który gwarantuje ciągłą, bezawaryjną i przede wszystkim – bezpieczną pracę.

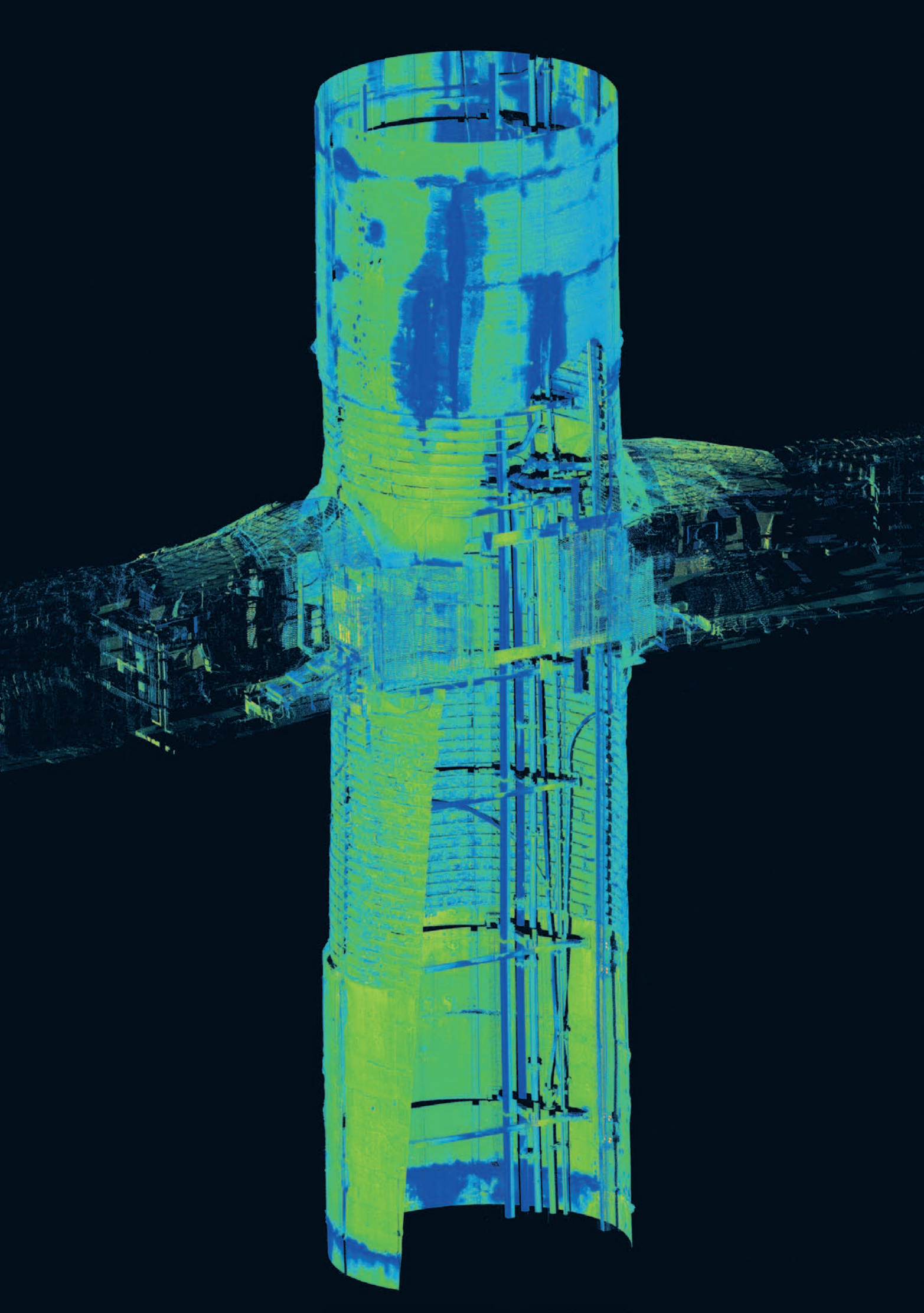
Doraźne rewizje (tzw. górnicze inspekcje) wykonywane są codziennie przed pierwszą zmianą. Harmonogram i zakres szczegółowych specjalistycznych rewizji poszczególnych elementów szybu i jego wyposażenia ściśle określają przepisy prawa górniczego. W nich znajduje się też zapis o konieczności prowadzenia okresowej geodezyjnej inwentaryzacji szybu, tzn. pomiaru: geometrii obudowy i elementów zbrojenia, pionowości szybu, prostoliniowości torów prowadzenia naczyń oraz wartości luzów między prowadnikami szybu a roboczymi płaszczyznami prowadnic ślizgowych, prowadnic tocznych i wielu innych elementów. Szczegółowy opis zawiera rozporządzenie ministra gospodarki z 28 czerwca 2002 r. (DzU nr 139, poz. 1169 ze zm.) – *w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych* wraz z załącznikiem nr 4 – *Transport pionowy i w wyrobiskach o nachyleniu powyżej 45°*.

Zawarte w tych dokumentach wytyczne precyzyjnie określają normy i granice, których przekroczenie grozi co najmniej awarią urządzeń szybowych. Z nich wynika milimetrowy poziom dokładności, jaki musi zostać zachowany przy inwentaryzacji szybu. Nie są to wymagania, którym dzisiejsza geodezja czy nawet skaning laserowy nie byłyby w stanie podołać. Jednak w kopalni warunki, w jakich należy tej precyzji dotrzymać, są dalekie od sprzyjających. Trudności zaczynają się od występowania zwykłych zjawisk atmosferycznych (jak wysoka wilgotność powietrza), poprzez bardziej skomplikowane (jak pionowa refrakcja), do problemów czysto eksploatacyjnych (pył węglowy czy szlam zgromadzony na zabudowie szybu). Te i jeszcze liczne inne czynniki powodują, że uzyskanie dokładności pomiaru odległości na poziomie 1 mm jest trudne, a czasami niemożliwe do osiągnięcia dla nowoczesnych technologii skanowania laserowego. Bo do takich należy nadal w kopalniach pomiar mobilny z wykorzystaniem skanerów profilowych.

Rys historyczny

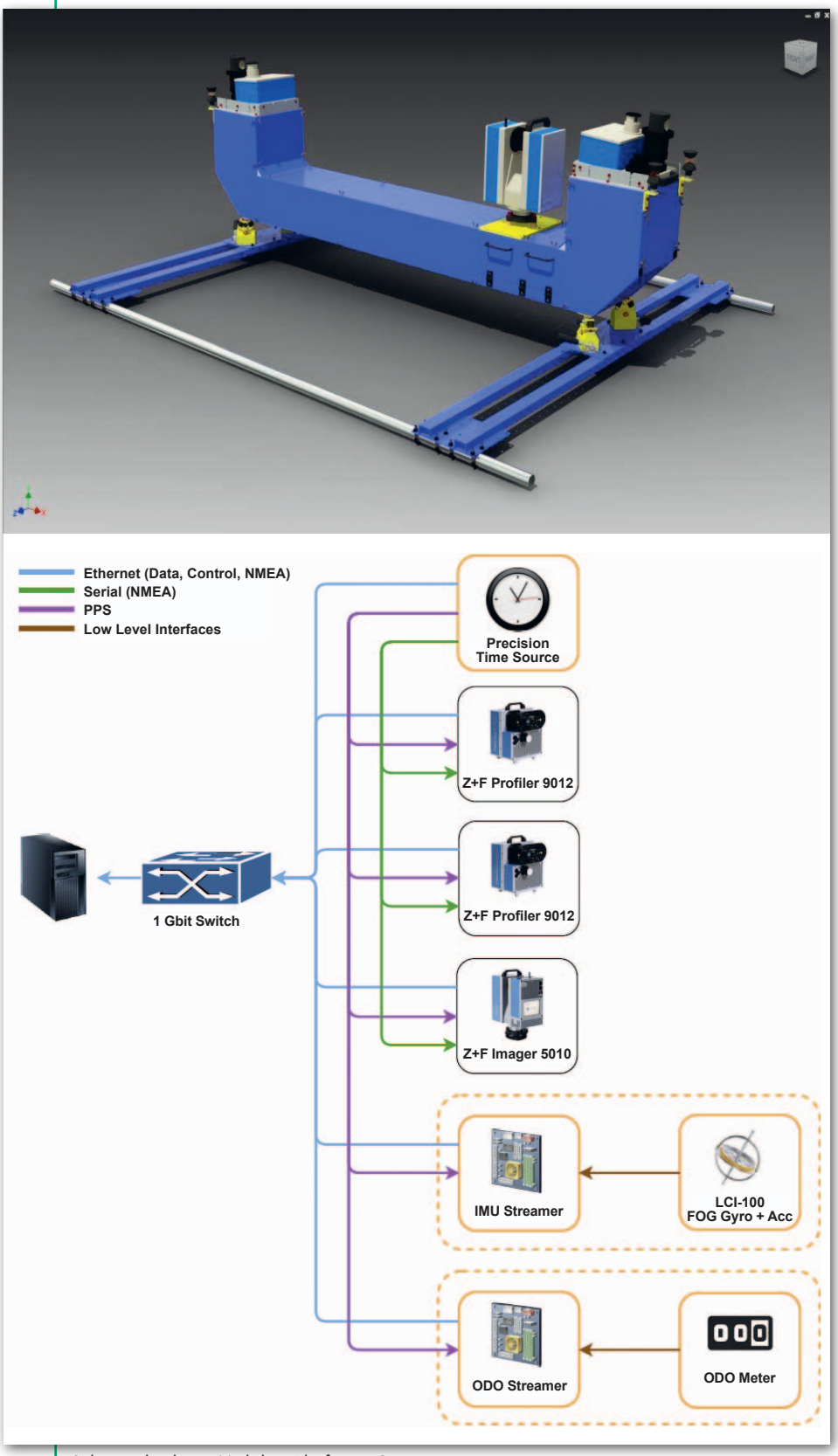
Obecnie pomiar elementów geometrii w szybach górniczych prowadzony jest różnymi technikami. Klasyczny geodezyjny pomiar wykonywany jest w trybie stacjonarnym. Klatka szybowa zatrzymuje się przy kolejnych dźwigarach szybu i mierzone są tylko wybrane punkty, co wiąże się z dużą czasochłonnością pomiaru oraz w efekcie z koniecznością wstrzymania ruchu w danym szybie na czas wykonywania prac mierniczych, co może trwać nawet kilka zmian. Również to, że mierzone są tylko wybrane elementy charakterystyczne szybu, wpływa na jakość i kompletność informacji o stanie technicznym obiektu. Brakowało zatem dotąd na rynku kompleksowego i automatycznego systemu pomiarowego,

Chmura punktów fragmentu rury szybowej i przyszybia zebrana przez Mobilną Platformę Górniczą – widoczne elementy wyposażenia i zabudowy szybu oraz przecieki wody w obmurzu (ciemne plamy)



a przede wszystkim systemu uniwersalnego. Takiego, za pomocą którego – niezależnie od czynników technicznych czy panujących w szybie warunków – bylibyśmy w stanie wykonać pełną inwentaryzację szybu górniczego wraz ze wszystkimi jego elementami zgodnie z obowiązującymi przepisami i wynikającymi z nich dokładnościami.

Sytuacja ta stała się impulsem dla firmy SKALA 3D do zrealizowania projektu badawczo-rozwojowego w celu stworzenia takiego systemu pomiarowego. Prace rozpoczęły się pod koniec 2011 roku w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka. W 2014 roku opracowano pierwszy prototyp, a dzięki Regionalnemu Programowi Operacyjnemu wyniki prac zostały wdrożone w działalności firmy – powstała Mobilna Platforma Górnicza (MPG). W tym samym roku wykonano pierwsze mobilne pomiary szybów z wykorzystaniem zbudowanego systemu. Realizacja projektów unijnych umożliwiła stworzenie interdyscyplinarnego zespołu oraz nawiązanie ścisłej współpracy z dr. hab. inż. Tomaszem Lipeckim, obecnym prodziekanem Wydziału Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, prekursorem skanowania laserowego szybów górniczych. Swoje doświadczenia w tym zakresie przedstawił on w monografii wydanej w ramach przewodu habilitacyjnego pt. „Kompleksowa ocena stanu geometrycznego obiektów i urządzeń szybowych z zastosowaniem skaningu laserowego".

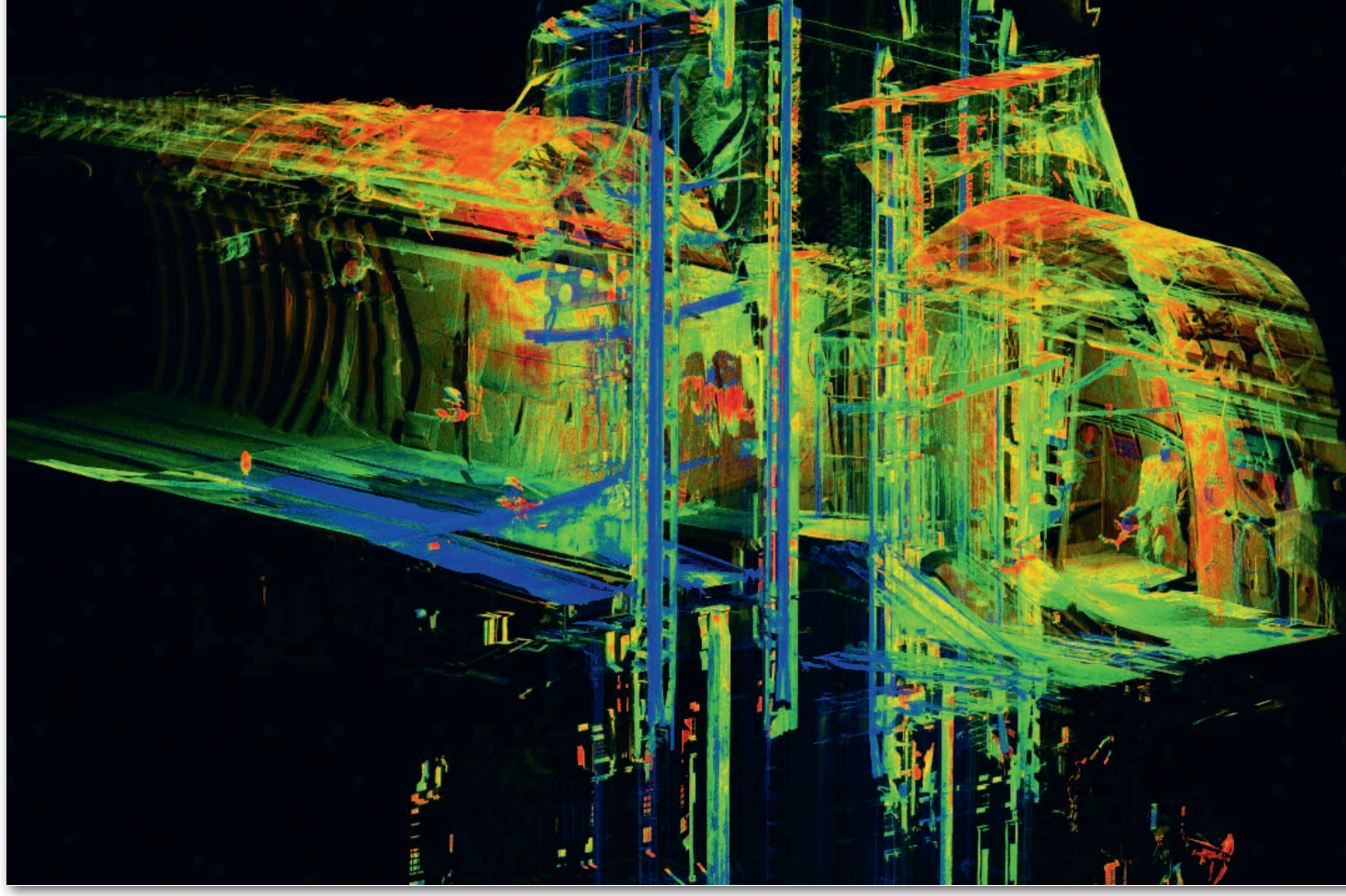


Schemat budowy Mobilnej Platformy Górniczej

Jak jest zbudowana MPG

Mobilna Platforma Górnicza oparta jest na technologii skanowania laserowego oraz odczytach sensorów precyzyjnej jednostki inercyjnej (IMU). Innowacyjnym rozwiązaniem jest między innymi zastosowanie mobilnego trybu pomiaru pod ziemią, gdzie nie dociera sygnał z satelitów, a co za tym idzie, nie ma możliwości wyznaczania trajektorii przejazdu systemu w czasie rzeczywistym z użyciem danych (korekt pozycji) z pomiarów GNSS. Do budowy trajektorii wykorzystywane są dane geometryczne płynące ze skanerów laserowych (dwa urządzenia Z+F Profiler 9012 oraz jedno Z+F Imager 5010) oraz odczytów akcelerometrów i żyroskopów IMU (Northrop Grumman LCI-100). Platforma pomiarowa wyposażona została również w zestaw wibroizolatorów zapobiegający przenoszeniu się na układ pomiarowy części drgań wstępujących podczas jazdy naczynia. Wraz z modułem sterującym i zbierającym dane całość tworzy skalibrowany system, który w krótkim czasie jest w stanie dostarczyć praktycznie kompletnych przestrzennych danych pomiarowych.

Dzięki zastosowaniu nowatorskich rozwiązań technologiczno-informatycznych system jest unikalny w skali światowej, co potwierdziła wizyta na kanadyjskich targach górniczych w tym roku. Przy spełnieniu określonych warunków technicznych mobilne skanowanie laserowe ma szansę stać się podstawowym narzędziem do inwentaryzacji i monitorowania stanu technicznego szybów



Widok chmury punktów fragmentu podszybia jednego z szybów „Bogdanki" w barwnej palecie intensywności odbicia wiązki lasera

górniczych zgodnie z obowiązującymi przepisami górniczymi. System pomiarowy został objęty ochroną Urzędu Patentowego w grudniu 2015 roku, a raport o stanie techniki uzyskał najwyższą ocenę (AAA). W roku bieżącym oczekujemy na zakończenie procedury patentowej.

MPG w praktyce

W pomiarach szybów liczy się dzisiaj przede wszystkim czas wykonania usługi i jej bezpieczeństwo, następnie technologia wykonania i koszt. Szczególnie w przypadku szybów wydobywczych kopalnie nie mogą pozwolić sobie na przestój kilkuzmianowy. Niewskazana jest również technologia pomiaru, która wymaga pracy człowieka w świetle szybu. I w tym zakresie mobilne skanowanie laserowe zdecydowanie przewyższa zarówno klasyczne metody pomiarowe, jak i skanowanie stacjonarne. Obie te techniki wymagają bowiem pracy mierniczego górniczego przez kilka zmian (kilkadziesiąt godzin) oraz niejednokrotnie poza obrysem klatki szybowej.

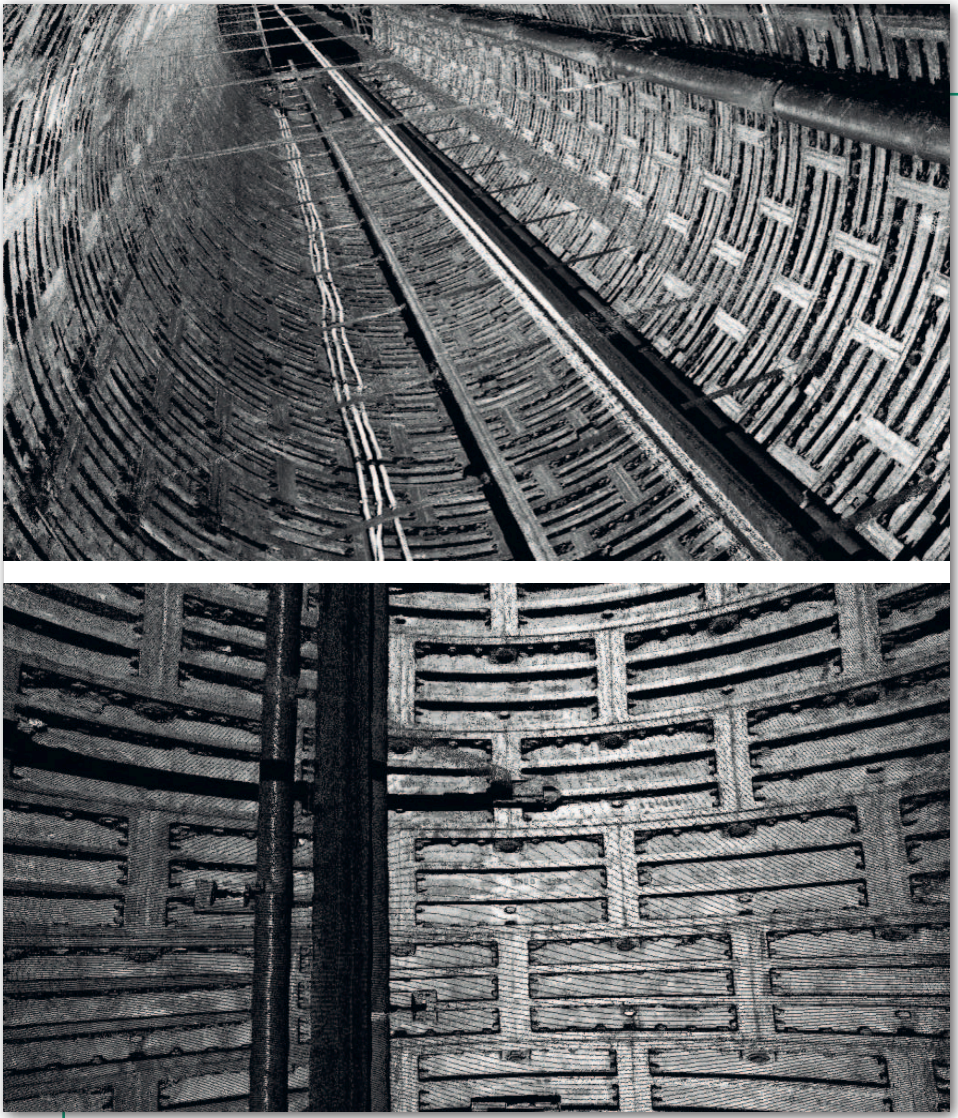
Pomiar z użyciem MPG gwarantuje obecnie najwyższy poziom bezpieczeństwa prowadzenia prac mierniczych w szybie. Nie wymaga on pracy człowieka w świetle szybu i po uruchomieniu jest w pełni automatyczny. Platforma pomiarowa umieszczana jest na głowicy klatki szybowej, a osoba monitorująca jej pracę przebywa na tzw. piętrze klatki (w jej wnętrzu). Czas pomiaru całej rury szybowej zależy od liczby przedziałów, głębokości szybu oraz prędkości przejazdu i zwykle waha się od 1,5 do 3 godzin (dla średniej głębokości szybu 1000 metrów i dwóch przedziałów). Zazwyczaj potrzebne są minimum dwa przejazdy po zewnętrznych stronach przedziałów. Dzięki przeciwstawnemu rozmieszczeniu skanerów na platformie, które daje pełny widok przekroju tarczy szybowej, uzyskujemy komplet informacji. Przejazd realizowany jest w przedziale prędkości 0,5-1 m/s, przy jednoczesnym obrocie głowic z częstotliwością 200 Hz i liczbie mierzonych punktów na poziomie 2 mln na sekundę. Takie parametry pomiaru pozwalają uzyskać rozdzielczość 3 x 3 mm i w zależności od warunków panujących w szybie – dokładność pomiaru odległości ±1-3 mm w pojedynczym profilu. Dokładność bezwzględna współrzędnych XYZ zmierzonych za pomocą MPG dla punktu zlokalizowanego na „dnie" szybu zależy wyłącznie od zastosowanej referencji (pionowanie mechaniczne bądź laserowe). Dokładność ta waha się w granicach ±3-5 cm dla szybu o głębokości 1 kilometra.

Możliwości MPG

Pomiary z użyciem mobilnego systemu skanującego MPG pozwalają nie tylko na badanie geometrii szybu, ale również na wiele innych zastosowań, w tym bardzo specjalistycznych. Ostatnio jed-

Najważniejsze zalety technologii Mobilna Platforma Górnicza

- Zwiększenie bezpieczeństwa pracy, a przede wszystkim skrócenie czasu pozyskania pełnej informacji o stanie geometrycznym szybu, elementach jego zabudowy i urządzeniach wyposażenia szybu.
- Pozyskanie aktualnego stanu geometrycznego nawet najbardziej nieregularnych i niedostępnych elementów obiektu.
- Porównanie skanów wykonanych w różnych odstępach czasu, a tym samym wyznaczenie deformacji obmurza szybu.
- Uzyskanie na podstawie wykonanych skanów dowolnie zorientowanych przekrojów, określenie współrzędnych dowolnych punktów charakterystycznych oraz wyznaczenie dowolnych miar między tymi punktami w szybie.
- Możliwość wykorzystania wykonanych skanów do celów projektowych i realizacyjnych: kontrola odstępów ruchowych urządzeń, określenie prostoliniowości prowadników i pionowości tubingów, określenie geometrii szybu i wszystkich urządzeń, sprawdzenie poprawności montażu urządzeń lub przebudowy fragmentu szybu, wizualizacje rury szybowej, utworzenie aktualnej dokumentacji wideo np. do łatwiejszego zaplanowania akcji specjalnych (ratowniczych, awaryjnych).
- Utworzenie dodatkowej referencji w odniesieniu do zabudowy szybu (np. prowadniki szybowe, których przebieg określa się za pomocą innych metod).

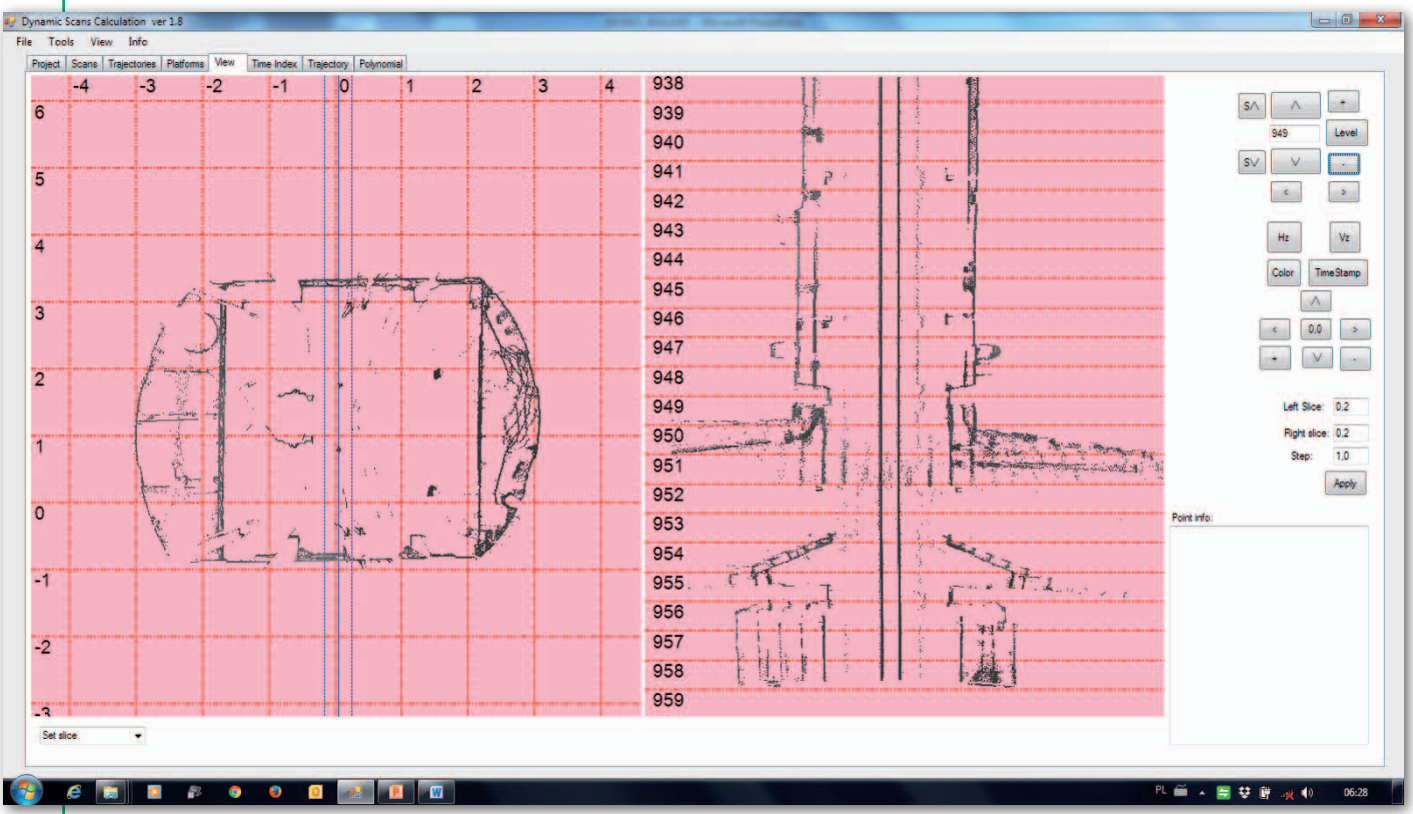


Chmura punktów prezentująca tubingową obudowę szybu oraz elementy jego wyposażenia wykonana przez Mobilną Platformę Górniczą – widoczna bardzo duża rozdzielczość pomiaru

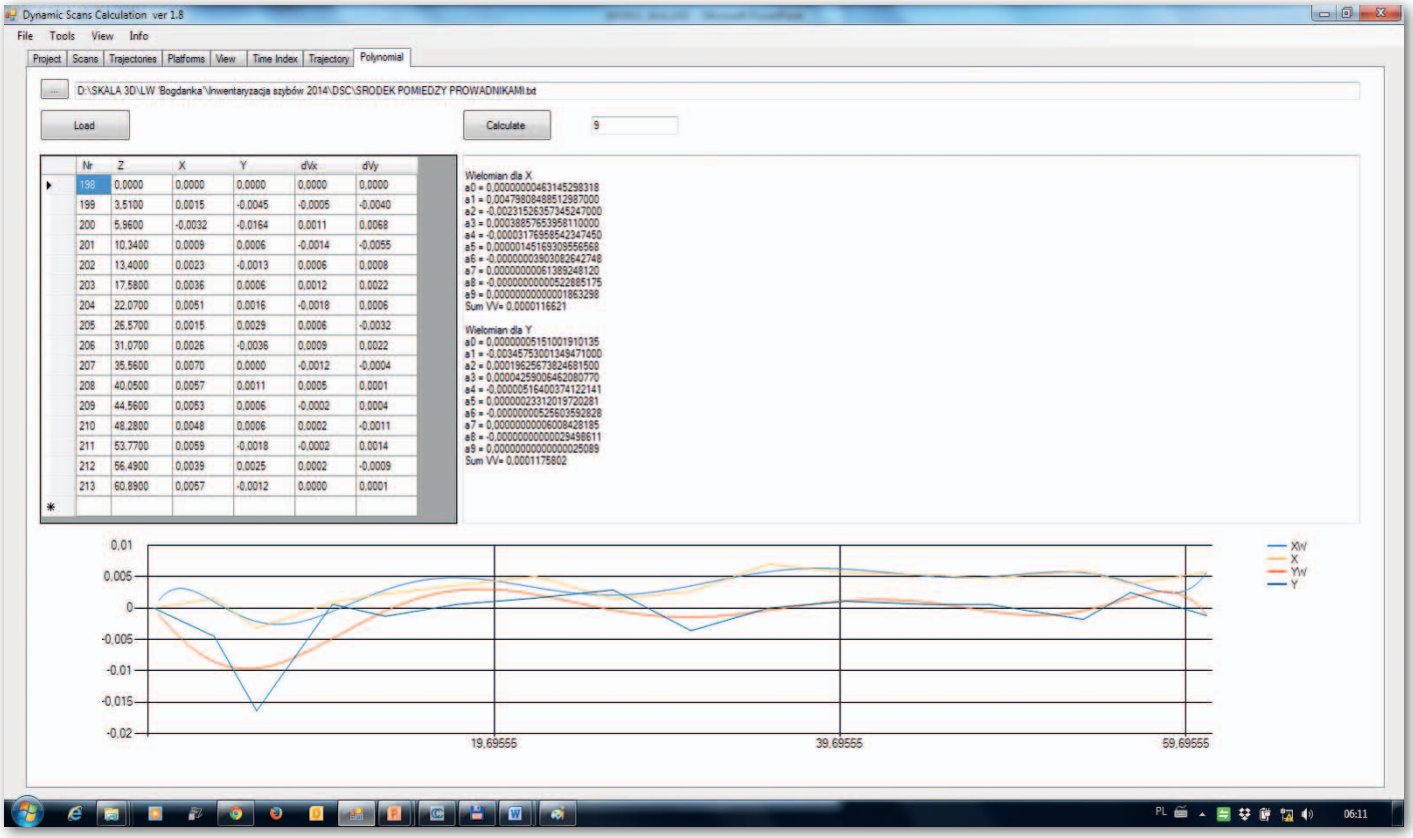
nym z nich było badanie trajektorii przejazdu naczynia wyciągowego (klatki) w szybie. Analiza mogła zostać wykonana dzięki rejestracji geometrii przez skanery profilowe i zbieraniu danych przez precyzyjną jednostkę inercyjną LCI-100.

Innym przykładem zastosowania MPG jest skan obmurza szybu na wybranym odcinku w celu analizy jego deformacji (degradacji) na podstawie wykonanej mapy hipsometrycznej prezentującej różnice odległości pomiędzy poszczególnymi fragmentami tego obmurza. Ta aplikacja MPG jest szczególnie ceniona i wykorzystywana przez dział szybowy zakładów górniczych. Wysoka rozdzielczość skanów pozwala również na wykrycie i zinwentaryzowanie miejsc przecieków wody w obmurzu szybu. Zazwyczaj to woda i postępująca erozja betonu powodują degradację ścian rury szybowej. Inwentaryzacja przed zasypaniem ponad 100-letniego szybu „Boże Dary" w Kopalni Węgla Kamiennego Murcki to kolejny przykład zastosowania MPG.

Podobnie jak przy skanowaniu stacjonarnym 3D możliwości wykorzystania danych z technologii mobilnej jest bardzo wiele, wszystko zależy od zapotrzebowania. Mobilna Platforma Górnicza to rozwiązanie pozwalające już na obecnym etapie realizować pomiary inwentaryzacyjne wyciągu szybowego z wysoką użytecznością. System ten – dzięki



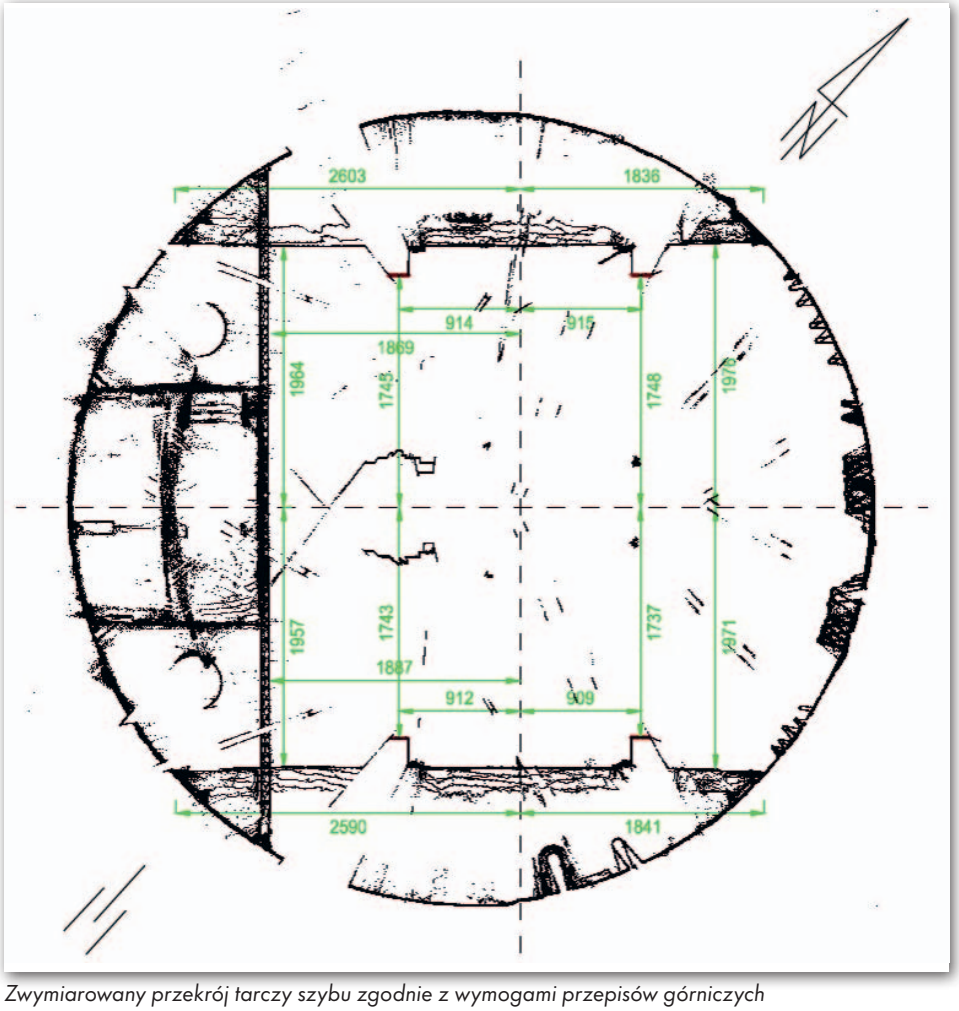
Przekrój poprzeczny i podłużny szybu z widocznym wlotem poziomu załadowczego – zrzut ekranowy z oprogramowania do postprocessingu Dynamic Scans Calculation



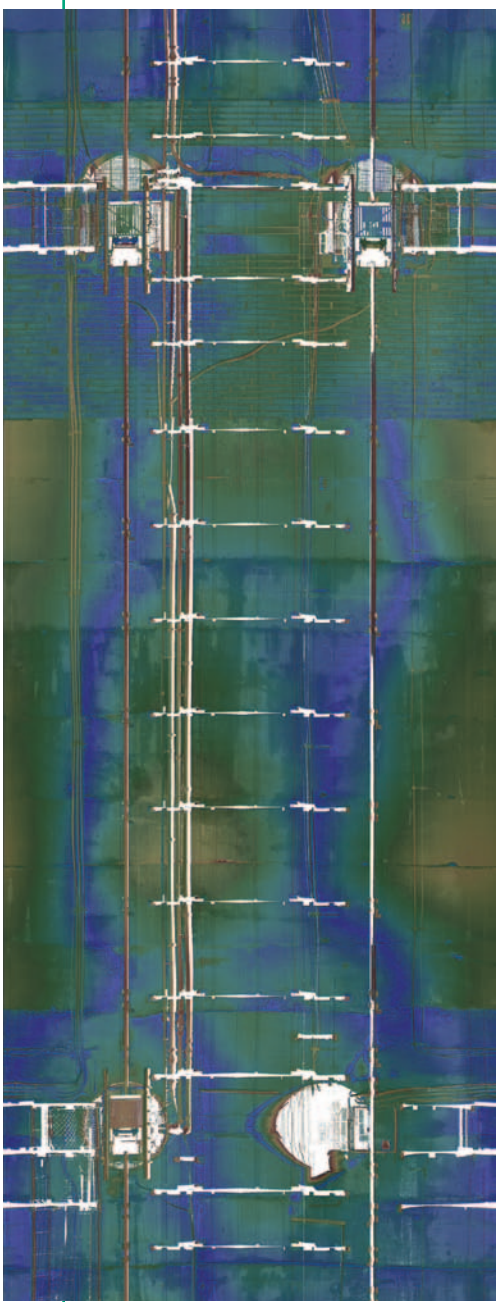
Wyznaczenie parametrów wielomianu opisującego prostoliniowość prowadników szybowych niezbędnych do obliczenia odchyłek rzeczywistego przebiegu prowadników w jednym z szybów kopalni „Bogdanka" – zrzut ekranowy z oprogramowania DSC

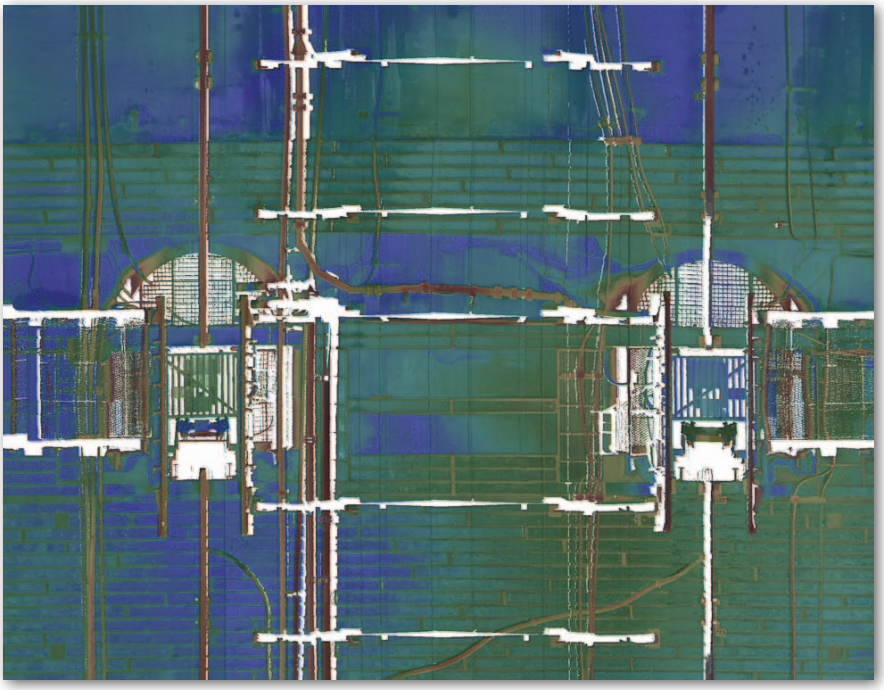
zastosowaniu unikatowych rozwiązań technologiczno-informatycznych – może znacznie przyspieszyć prace i zwiększyć zakres informacji pozyskiwanych w kompleksowych badaniach inwentaryzacyjnych szybów górniczych. Kolejne wykonywane pomiary szybów (zrealizowano ich już kilkanaście) dostarczają nowej wiedzy i wskazują kolejne problemy, które muszą być rozwiązane. Nie tylko atmosfera i panujące w szybie warunki powodują konieczność dokonywania stałych modyfikacji, ale również ciągle wzrastające wymagania zakładów górniczych związane z rozwojem technologicznym.

Głównym czynnikiem determinującym prowadzenie prac badawczych nad rozwojem tej technologii jest krótki czas dostępu do szybu, wynikająca z tego potrzeba zastąpienia klasycznych technik budowania referencji, duża wilgotność powietrza, problemy z odbiciem wiązki lasera czy identyfikacji zmierzonych elementów. Wymienione czynniki zdecydowały o przygotowaniu kolejnych projektów badawczych. Owocem tych prac są dwa kolejne już projekty unijne, które wesprą firmę w rozwoju technologii mobilnego skanowania laserowego w szybach górniczych. Ich celem będzie przeprowadzenie prac nad wykorzystaniem potencjału drzemiącego w precyzyjnej jednostce inercyjnej, zmiana



Zwymiarowany przekrój tarczy szybu zgodnie z wymogami przepisów górniczych





Analiza deformacji obmurza szybu przedstawiona w formie mapy hipsometrycznej

konstrukcji platformy na bardziej modułową i zabezpieczenie wrażliwych elementów systemu przed agresywnym środowiskiem panującym w szybach, szczególnie w kopalniach miedzi. Prace te wiążą się z koniecznością opracowania skomplikowanych algorytmów i przeprowadzenia precyzyjnych testów oraz wykonania specjalistycznych konstrukcji.

Górnictwo i miernictwo w Polsce

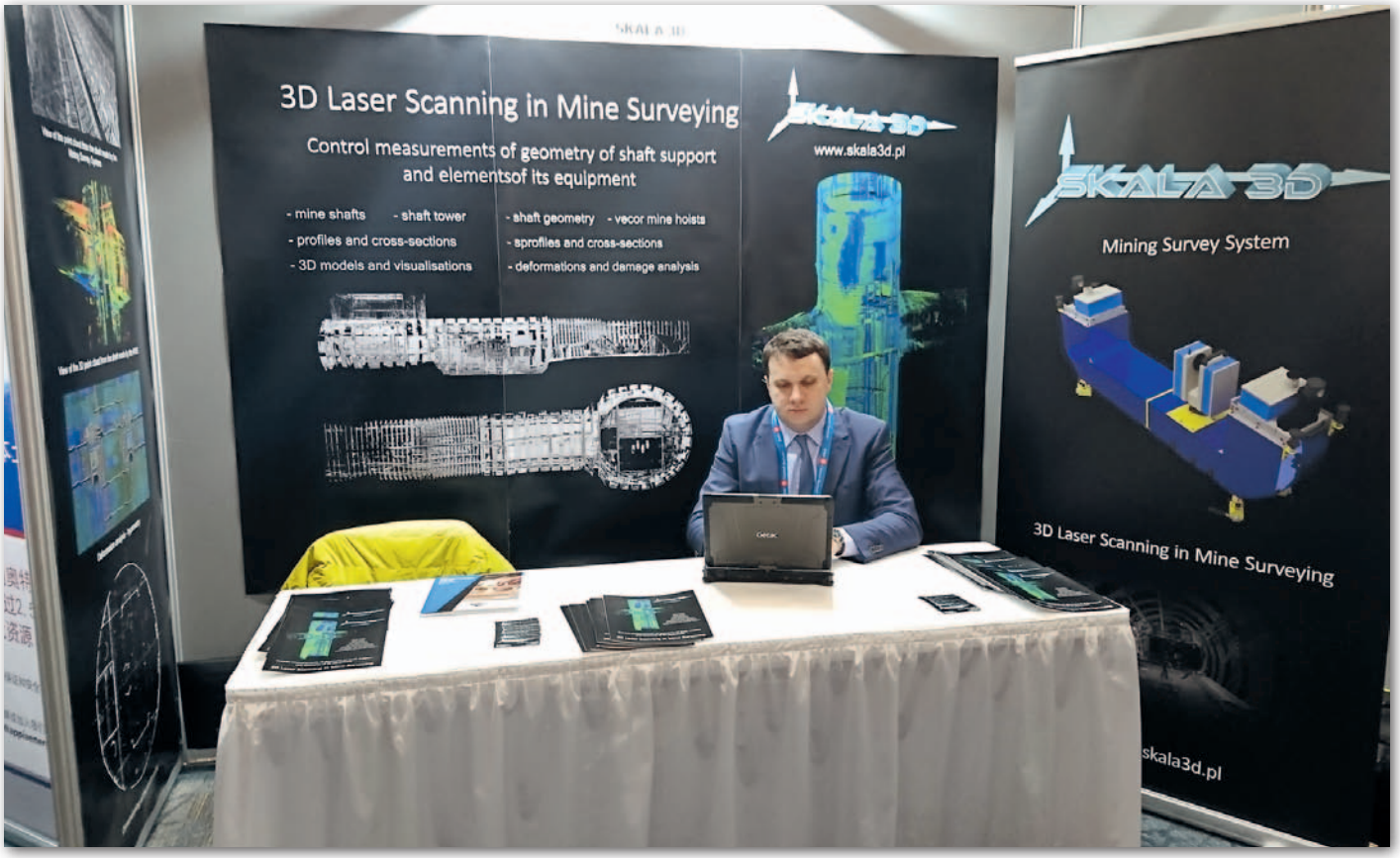
Z jednej strony nieustanny rozwój, z drugiej cięcia wydatków – tak w wielkim skrócie można określić stan polskiego górnictwa i miernictwa górniczego. Jeszcze do niedawna głośno było o „inteligentnych kopalniach", o potrzebie inwestowania w nowe technologie i innowacyjne rozwiązania. Przykładem mogą być mapy obiektowe czy dążenie do tworzenia trójwymiarowych modeli wyrobisk podziemnych całych kopalni. A z pewnością takim przykładem są tematy CuBR-u w ramach wspólnego konkursu NCBiR i KGHM Polska Miedź S.A., w którym to największa polska kopalnia chciała opracować autonomiczny park maszyn, czyli zastąpić pod ziemią pracę ludzi samodzielnymi maszynami, tak aby móc zautomatyzować proces wydobycia surowców na głębokościach poniżej 1200 metrów. Przygotowując się do tego tematu, konsorcjum, w skład którego wchodziły m.in. PIAP (Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów) oraz SKALA 3D, przeprowadziło testy robota wyposażonego w szereg czujników. W ramach tych testów wykonano również skanowanie laserowe na głębokości ponad 1200 metrów, w dość ekstremalnych już warunkach pracy zarówno dla człowieka, jak i maszyn (temperatura powietrza około 38°C i wilgotność ponad 90%). Inicjatywy te dowodzą, że nie tylko jest chęć, ale i realna potrzeba rozwoju technologii w górnictwie i miernictwie podziemnym. Niestety, nie przekłada się to w naszym kraju na obecnie planowane inwestycje i nakłady finansowe na badania.

Górnictwo i miernictwo na świecie – konwencja/targi PDAC 2017

PDAC (The Prospectors & Developers Association of Canada) to stowarzyszenie branżowe, które zrzesza ponad 300 firm z całej Kanady oferujących produkty, technologie oraz usługi dla przemysłu wydobywczego, m.in. zapewniając im wsparcie marketingowe. Poza firmami kanadyjskimi ma ono ponad 8 tys. członków na całym świecie. Misją stowarzyszenia jest promowanie globalnie odpowiedzialnego, tętniącego życiem i zrównoważonego przemysłu mineralnego. Jako zaufany przedstawiciel tego sektora PDAC zachęca do najlepszych praktyk w zakresie działań technicznych, operacyjnych, środowiskowych, bezpieczeństwa i społecznych. PDAC można porównać do dobrze nam znanego FIG-u (Międzynarodowej Federacji Geodetów).

Prace stowarzyszenia prowadzone są przez 36-osobową Radę Dyrektorów, 16 komisji i zespół stałych pracowników. Koncentruje ono swoje wysiłki m.in. na: dostępie do gruntów, sprawach dotyczących rdzennych mieszkańców Kanady i dostępie do kapitału. Znaczną uwagę poświęca także finansowaniu i opodatkowaniu, odpowiedzialności społecznej przedsiębiorstw, zasobom ludzkim, inicjatywom studentów, komunikacji i sprawom publicznym. Konwencja PDAC jest uważana za najważniejsze międzynarodowe wydarzenie dla przemysłu górniczego na świecie.

W dniach 5-8 marca 2017 roku SKALA 3D wzięła udział w Międzynarodowej Konwencji PDAC, wystawie branżowej oraz „wymianie" inwestorów. Ta największa na świecie impreza dla osób, firm i organizacji związanych z branżą górniczą zgromadziła w tym roku blisko 900 wystawców i ponad 24 tys. uczestników ze 130 krajów. Poza zwiedzaniem targów



Stoisko firmy SKALA 3D na targach PDAC 2017, gdzie corocznie spotykają się profesjonaliści z branży górniczej z całego świata

można było wziąć udział w sesjach technicznych, krótkich kursach i spotkaniach integracyjnych. Czterodniowa coroczna konwencja w Toronto była okazją do indywidualnych rozmów z profesjonalistami branży górniczej z całego świata, w tym: inwestorami, finansistami, szefami wielkich spółek, menedżerami, brokerami, analitykami, prawnikami, poszukiwaczami, urzędnikami państwowymi czy przedstawicielami mediów. Wiążą się z tym również nowe znajomości i pomysły, wzmocnienie partnerstwa i wyznaczenie nowych etapów wielkich transakcji międzynarodowych.

• Jak SKALA 3D znalazła się na PDAC i dlaczego...

Potrzeba rozwoju technologicznego MPG oraz ograniczone możliwości ekspansji na krajowym rynku były głównymi powodami wyjazdu firmy SKALA 3D na PDAC do Toronto. Choć liczba szybów w Polsce robi wrażenie, bo wciąż działających jest ponad 100, to kondycja kopalni, na terenie których znajduje się większość z nich, nie zachęca już do współpracy. Stąd naturalna potrzeba wejścia na rynki zagraniczne. A Kanada i w ogóle Ameryka Północna to zagłębie górnicze świata, podobnie zresztą jak Australia czy Republika Południowej Afryki.

Informacji o tym wydarzeniu udzielił naszej firmie radca minister Michał Faleńczyk z Wydziału Promocji Handlu i Inwestycji Konsulatu Rzeczypospolitej Polskiej w Montrealu. WPHI promował polski przemysł górniczy na PDAC w 2016 roku. Niestety, w związku z decyzją Ministerstwa Rozwoju o likwidacji tego wydziału z dniem 31 marca 2017 r. wszelkie zaplanowane działania promocyjne na rok 2017 zostały odwołane (tym samym nie zostało przewidziane stoisko wydziału na wystawie PDAC 2017). Jak się okazało, SKALA 3D była jedyną polską firmą prezentującą się na PDAC.

Dużym zaskoczeniem było dla nas to, że mimo znacznego potencjału technologicznego amerykańskiego i kanadyjskiego górnictwa tamtejsze miernictwo nie jest wyposażone w tak zaawansowane technologie jak w Europie. Dlatego na odwiedzających stoisko firmy SKALA 3D wrażenie robiła przede wszystkim rozdzielczość i dokładność otrzymywanych z MPG chmur punktów. Zainteresowanie budziła również możliwość wykonania pomiarów określenia pionowości szybu czy prostoliniowości prowadników szybowych. To słabsze zaawansowanie może być związane z mniej rygorystycznymi przepisami dotyczącymi bezpieczeństwa pracy w szybach niż obowiązujące na Starym Kontynencie. Bo raczej trudno składać to na karb oszczędności czy braku kapitału w przeważającej liczbie kopalni złota i rud.

Nasze stoisko cieszyło się sporym powodzeniem, biorąc pod uwagę specjalistyczny zakres usług. Zgłosiło się co najmniej kilkanaście firm i instytucji zainteresowanych naszymi produktami. Obecnie prowadzone są rozmowy i wymiana informacji z nadzieją na ciekawe kontrakty.

Inne korzyści firmy SKALA 3D z udziału w PDAC 2017 to przede wszystkim możliwość dokonania przeglądu światowego rynku górniczego w zakresie stosowanych technologii. To nowe i kolejne doświadczenie na drodze rozwoju potencjału i poszerzenia zakresu usług oraz portfolio firmy. To w końcu jedna z inwestycji, bez których rozwój polskich przedsiębiorstw na zagranicznych rynkach nie będzie możliwy.

W Europie odpowiednikiem PDAC jest Euro Mine Expo organizowane corocznie w Skellefteå w Szwecji. W Polsce miejsce spotkań branży górniczej (mierniczej) są: Szkoła Eksploatacji Podziemnej w Krakowie, Dni Mierniczego oraz Kongres Rud Miedzi organizowany przez KGHM Polska Miedź S.A., na którym zresztą w 2015 roku SKALA 3D zdobyła Złoty Medal za najlepszą prezentację.

Tekst Artur Adamek,
rendery Mateusz Baran
SKALA 3D