

WYKORZYSTANIE MODELOWANIA ZŁÓŻ W BIEŻĄCEJ OBSŁUDZE GEOLOGICZNEJ KOPALŃ ODKRYWKOWYCH ZŁÓŻ KRUSZYW NATURALNYCH ORAZ SUROWCÓW SKALNYCH

APPLICATION OF A DEPOSIT BLOCK MODELLING IN THE COMMON GEOLOGICAL SURVEY AT OPEN PIT MINES, SAND AND GRAVEL PITS OR AT QUARRIES

Wojciech Chudzik, Mateusz Czarnomski, Jakub Garczarek - LafargeHolcim

W artykule omówiono możliwości jakie niesie ze sobą wykorzystanie cyfrowego modelowania złóż w zakresie obsługi geologicznej kopalń odkrywkowych zarówno wobec wymagań jakie stawiają regulacje prawne, jak również wobec potrzeb przedsiębiorcy. Przedstawiono specyfikę modeli blokowych w zależności od rodzaju złoża, z wyszczególnieniem złóż kruszyw naturalnych, złóż kruszyw skalnych oraz złóż surowców cementowych.

Słowa kluczowe: komputerowe modelowanie złóż, obsługa geologiczna kopalń odkrywkowych, szacowanie zasobów kopaliny, parametry modelu blokowego

The article discusses the possibilities of using a digital deposit modelling in the common geological survey at open pit mines, towards the requirements of an actual law regulations and a specific needs of the entrepreneur. Block model characteristics of different sorts of deposits have been presented, specifying the sand and gravel, aggregates and cement raw material deposits.

Keywords: digital deposit modelling, open pit mines geological survey, deposit resources and reserves estimation, block model input parameters

Wstęp

Minęło już ponad 20 lat odkąd komputerowe wspomaganie prac związanych z geologiczną obsługą kopalń stało się powszechnie dostępne wśród specjalistów zajmujących się tym zagadnieniem.

W latach 90-tych ubiegłego wieku istniały wdrożone już w wielu przedsiębiorstwach górniczych narzędzia pozwalające na wykonywanie w pełni zaawansowanych analiz na modelach blokowych złóż – i w zasadzie od tego czasu zwiększyły się jedynie moce obliczeniowe komputerów, szata graficzna i interfejs oprogramowania. Spodziewać się zatem można było, że praca na komputerowych modelach złóż zupełnie zastąpi dotychczasowy sposób pracy, oparty przede wszystkim na „klasycznych” metodach szacowania zasobów i parametrów złoża.

Pomimo wielu korzyści jakie niosą nowoczesne metody obliczeń i analiz geologicznych, w niektórych przypadkach wykorzystanie zaawansowanych funkcji współczesnych komputerów mija się po prostu z celem, komplikując jedynie organizację pracy. W niniejszym artykule przybliżone zostaną sytuacje, w których komputerowe modelowanie złóż jest niezbędne, sytuacje w których obydwie formy pracy reprezentują tą samą wartość oraz sytuacje, w których posługiwanie się cyfrowym modelem jest wręcz niewskazane.

Obsługa geologiczna zakładów górniczych

Zakres obowiązków służby geologicznej w zakładach górniczych ściśle definiują regulacje prawne, głównie § 154. rozporządzenia Ministra Gospodarki z dnia 8 kwietnia 2013 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu odkrywkowego zakładu górniczego. Oprócz zadań wymienionych w zapisach prawa, przedsiębiorca może wymagać w ramach obsługi swojego zakładu górniczego wykonanie dodatkowych dokumentów, takich jak m.in. długoterminowego planu wydobywania (z ang. *mining plan*). Tego rodzaju opracowania pozwalają na zaplanowanie eksploatacji w perspektywie całego życia kopalni, z podziałem na krótsze, mierzalne etapy oraz zachowaniem stałości i ciągłości wydobywania. Dużą zaletą *mining plan*’ów jest wypracowanie kompromisu między racjonalną gospodarką złożem, a potrzebami i możliwościami techniczno-ekonomicznymi przedsiębiorcy.

Złóża kruszyw naturalnych

Przy definiowaniu modelu złoża kruszywa naturalnego pierwszym istotnym elementem jest odzwierciedlenie jego wyjątkowo nieregularnej geometrii. Przy stosunkowo niewielkiej miąższości złoża krytyczne jest uchwycenie falistego przebiegu jego stropu i spągu, będącego pochodną urozmaiconej morfologii terenu, powstałą zwykle w wyniku procesów glacialnych.



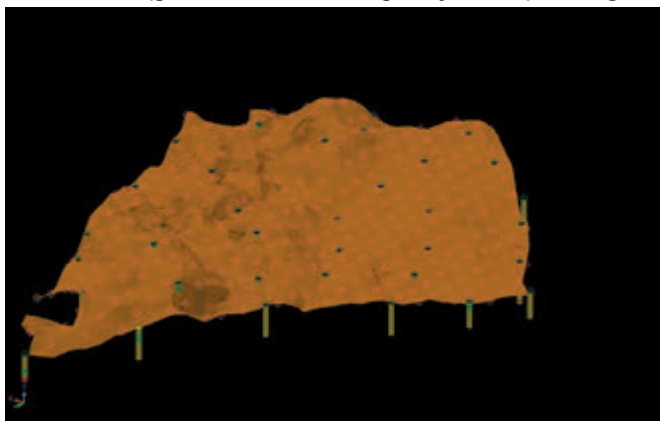
Rys. 1. Przekrój geologiczny przez złoża kruszywa naturalnego [2]
 Fig. 1. Geological cross section through sand and gravel deposit [2]

Określenie poprawnego przebiegu powierzchni terenu, stropu i spągu złoża umożliwiła zamodelowanie grubości nadkładu oraz miąższości złoża.

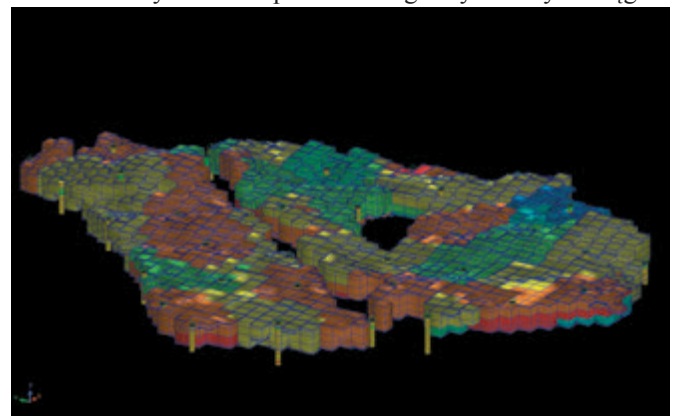
Powyższy problem w przypadku złóż kruszyw naturalnych, których użytkownikiem jest firma LafargeHolcim, rozwiązuje się przy użyciu oprogramowania typu cad, graficznego oraz górniczego - w szczególności Surpac firmy Geovia. Punktem wyjściowym jest trójwymiarowa mapa utworzona w programie typu cad z chmurą punktów, odzwierciedlająca powierzchnię terenu. Stanowi ona bazę dla numerycznego modelu terenu tworzonego w Surpacu (dtm - z ang. *digital terrain model*). Program ten umożliwia utworzenie dwuwymiarowej zregulowanej siatki punktów pokrycia terenu (grid) oraz „rzucenie” jej na trójwymiarową powierzchnię topograficzną. W efekcie otrzymujemy trójwymiarową, regularną siatkę punktów wraz z dostępem do współrzędnych (x, y, z) każdego węzła w pliku tekstowym. Kolejnym krokiem jest wykorzystanie danych z geologicznych otworów rozpoznawczych. W praktyce ilość otworów geologicznych wykonanych dla udokumentowania złoża bywa zbyt mała, aby uchwycić charakterystyczne punkty przebiegu jego granic poziomych. Rozwiązanie przynosi korelacja pomiędzy morfologią terenu, a powierzchnią stropu i spągu złoża - oczywiście jest, że im bliżej powierzchni, tym wpływ morfologii na budowę złoża jest większy, zatem przy niewielkiej miąższości złoża można uznać, że ukształtowanie jego spągu może również być pod silnym wpływem geomorfologicznym. W takim przypadku dobrą praktyką jest utworzenie kolejnej siatki punktów - tym razem dla powierzchni stropu złoża, a następnie dokonanie interpolacji na węzłach, gdzie

źródłem danych do estymacji jest głębokość nawiercenia stropu w otworach geologicznych. Następnie po pomniejszeniu w programie typu Excel wartości rzędnej terenu o interpolowane głębokości nawiercenia stropu, uzyskujemy siatkę interpolacyjną z przebiegiem powierzchni stropu złoża. Powierzchnia ta z uwagi na uwzględnienie geomorfologii najprawdopodobniej lepiej odzwierciedla rzeczywisty przebieg stropu złoża niż powierzchnia uwzględniająca tylko dane otworowe, chyba że gęstość siatki rozpoznawczej jest na tyle duża aby udokumentować lokalizacje geometrycznych punktów przegięcia. Grubość nadkładu możemy oczywiście uzyskać wprost z otworów geologicznych, interpolując głębokość nawiercenia stropu złoża na węzły zdefiniowanej siatki interpolacyjnej. Powierzchnię spągu złoża otrzymujemy w analogiczny sposób jak stropu, czyli przez odjęcie od rzędnych punktu terenu głębokości nawiercenia stropu. Dysponując powierzchniami w formie siatki punktów w pliku tekstowym, możemy automatycznie wygenerować ich model (dtm) w programie Surpac. Pliki dtm są niezbędne przy graficznym definiowaniu ograniczeń modelu, np. wyodrębnienie bloków nadkładu bądź bloków złożowych. Należy pamiętać o odpowiednim dobraniu wielkości bloków, których rozmiary poziome mogą wahać się od kilku do kilkudziesięciu metrów (w zależności od gęstości danych geologicznych i wielkości złoża), natomiast rozmiar pionowy od kilku centymetrów do kilku metrów w celu uniknięcia zbytniego uproszczenia geometrii złoża.

Dla złóż kruszyw naturalnych najważniejsze parametry związane z ich jakością to punkt piaskowy, zawartość pyłów, zawartość poszczególnych frakcji zwirowych. Parametry te można estymować wprost ze zregulowanych ciągów



Rys. 2. Numeryczny model terenu wraz z regularną siatką interpolacyjną i otworami wiertniczymi [3]
 Fig. 2. Digital terrain model supplemented with regular grid of interpolation and geological drill holes [3]



Rys. 3. Model blokowy przedstawiający wartości punktu piaskowego w blokach [3]
 Fig. 3. Block model presenting sand point values within blocks [3]

punktów otrzymanych z bazy geologicznej. Charakter złóż kruszyw naturalnych pozwala na zastosowanie prostej estymacji w/w parametrów na bloki złożowe, a następnie przedstawienie ich w przystępny graficznie sposób.

Praktyka pokazuje, że w przypadku niewielkich złóż kruszyw naturalnych o niewielkiej liczbie i gęstości danych geologicznych, w zupełności wystarczy wykonanie map izolinowych stropu, spągu lub parametrów jakościowych złoża w celu ich zobrazowania.

Złóża kruszyw skalnych

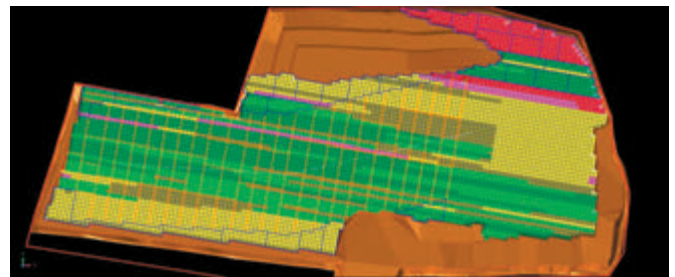
W przypadku surowców skalnych, problem zdefiniowania naturalnych granic złoża sprowadza się najczęściej do określenia powierzchni jego stropu ponieważ duża miąższość tego typu złóż powoduje, że prace geologiczne nie obejmują swym zasięgiem udokumentowania naturalnego spągu złoża, a jedynie stały poziom, tj. do rzędnej dokumentowania. Podobna sytuacja ma miejsce w przypadku pionowych granic złoża, które współcześnie bardzo rzadko są tożsame z jego naturalnymi granicami – zwykle zdeterminowane są ograniczeniami prawno-własnościowymi. Dla przedsiębiorcy najważniejsza jest informacja o zasobach możliwych do wydobycia, a głównym czynnikiem decydującym o ilości tych zasobów w szczegółowo rozpoznanym złożu jest geometria wyrobiska górniczego. Na etapie modelowania wyrobiska często określa się różne jego warianty projektowe, przy uwzględnieniu półek roboczych i docelowych. Istotna jest w tym momencie ścisła współpraca służby geologicznej z działem górniczym, aby efekt pracy geologa mógł być zastosowany w praktyce i w planowaniu eksploatacji złoża. Duża odległość pomiędzy danymi z otworów rozpoznawczych narzuca dobrane stosunkowo dużych poziomych rozmiarów bloków modelu, w celu uniknięcia sztucznego zawyżenia dokładności szacowania wartości parametrów. Geometria wyrobiska nie pozwala jednak na tego typu generalizacje i pomimo odległości między punktami rozpoznawczymi rzędu 150-300 m, rozmiary bloków nie powinny przekraczać 10-15 m w poziomie oraz 1 m w pionie. Poziome ograniczenia usprawiedliwić można brakiem dokładności czy to w odzwierciedleniu zasobów do wydobycia, czy to wyeksploatowanych już zasobów w okresie rozliczeniowym. Pionowe ograniczenia natomiast wiążą się z brakiem funkcji we wspomnianym oprogramowaniu Surpac, tj. tworzenia różnych wysokości bloków w zależności od poziomu i lokalizacji w jednym modelu. W praktyce rzadko się zdarza, że poszczególne piętra eksploatacyjne posiadają tę samą wysokość, zatem pozostaje ustawienie wysokości bloków równej np. 1 m. Wiąże się to niestety z bardzo dużą ilością danych zgromadzonych przez takie modele, a w związku z tym także długim czasem obliczeń.

Przy zamodelowanych ograniczeniach złożowych należy nadać blokom odpowiednie parametry jakościowe. Dla złóż surowców skalnych najważniejsze są parametry fizykomechaniczne określające ich przydatność do produkcji kruszywa, np. mrozoodporność, ścieralność, wytrzymałość na ściskanie. Parametry estymacji związanej z jakością złoża powinny być dostosowane do jego formy oraz genezy. W przypadku złóż osadowych, np. wapieni, dolomitów, margli uwzględnia się upady warstw litologicznych oraz ich rozciągłości. Parametry

mogą wykazywać zmienność ciągłą w obrębie danej jednostki litologicznej. W przypadku skał wylewnych, np. bazaltowych, bliżej rzeczywistości będzie estymacja charakteryzująca ośrodek skalny jako jednorodny, a przy nagłej zmianie wartości parametrów jakościowych należy dopatrywać się zjawisk tektonicznych, tj. np. uskoków. W związku z tym, że estymacja uśredniająca parametry nie odzwierciedla charakteru ośrodka skalnego, należy zastosować zwykle przypisanie różnych wartości parametru dla ośrodków rozdzielonych tektonicznie.

Modelowanie złóż surowców cementowych

Modelowanie komputerowe jest szczególnie przydatnym rozwiązaniem w przypadku obsługi geologicznej złóż surowców chemicznych, w tym cementowych, gdzie ważącym czynnikiem jest skład chemiczny skały. Rozwiązania takie, ze względu na chęć podniesienia wiarygodności opracowywanych dokumentów stosowano już w latach 90. Specjalistyczne firmy z branży produkcji materiałów budowlanych, w tym cementu, wobec braku najbardziej im odpowiadającego oprogramowania



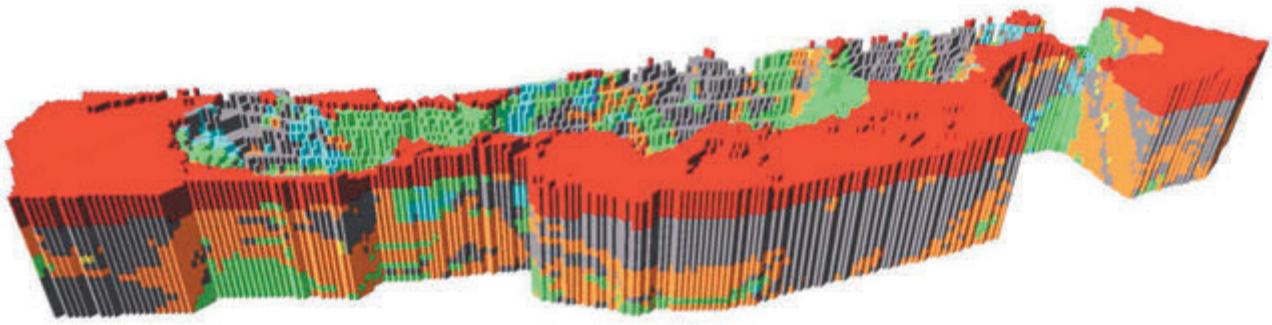
Rys. 4. Model blokowy na tle wyrobiska górniczego z wizualizacją wartości parametru jakościowego

Fig. 4. Block model presented on the designed mining pit, showing quality parameters value

na ówczesnym rynku, podejmowały się tworzenia aplikacji według własnych potrzeb. Przykładem takiego działania było stworzenie przez firmę Lafarge programu do modelowania złóż surowców cementowych - QMS MineCad (1999). Narzędzie to, w dalszym ciągu wspiera obsługę geologiczną złóż cementowych firmy LafargeHolcim.

Parametry chemiczne, a klasyfikacja surowca

Jak już wcześniej wspomniano prognozowanie rozkładu poszczególnych składników chemicznych w przestrzeni odgrywa najistotniejszą rolę w przypadku modelowania złóż surowców cementowych i jest niezbędne dla określania zasobów surowca dla poszczególnych produktów. Obliczenie zasobów jest ważnym punktem tworzenia dokumentacji geologicznej złoża oraz Projektu zagospodarowania złoża, wobec czego przedsiębiorcy w trosce o należyłą dokładność opracowań stawiają na dane pozyskane przy użyciu modelowania komputerowego. Dodatkowo, bardzo często kryterium do klasyfikacji złoża według wymagań odbiorców stanowi kilka składników chemicznych jednocześnie, takich jak SiO_2 , CaO , SO_3 , MgO , Al_2O_3 i inne. Zadania nie ułatwia również fakt, że charakterystyki chemiczne części z produktów pokrywają się, co w praktyce przekłada się na sytuację kiedy dany surowiec spełnia kryteria kilku odbiorców. Oszacowanie zasobów w takim przypadku, bez wsparcia ze strony modeli blokowych złoża byłoby nad wyraz trudne i pracochłonne, a co za tym idzie mogłoby generować zbyt wiele błędów kalkulacyjnych.



Rys. 5. Wizualizacja rozmieszczenia gatunków surowcowych w złożu wapieni i margli jurajskich Barcin - Piechcin Pakość, wykonana przy pomocy oprogramowania Geovia Surpac [1]

Fig. 5. Situation of different types of raw material in Barcin - Piechcin - Pakość jurassic limestone and marl deposit, made with Geovia Surpac

Problematyka związana ze zbyt małą ilością danych

Kluczem do wszelkich operacji i obliczeń na modelu jest jego prawidłowe i rzetelne przygotowanie, zwłaszcza jeśli oprócz kryteriów ilościowych należy wprowadzić pełne spektrum analiz chemicznych każdego wydzielania. W zależności od zmienności złoża - danych prognozowanych lub opartych na doświadczeniu na danym złożu, zakładane są różne odstępy w pobieraniu prób z wierceń dla analiz chemicznych, najczęściej od 2 m (przy dość dużej zmienności) do 10 m (przy niewielkiej zmienności pionowej parametrów). Im więcej danych zostanie pozyskanych z otworów wiertniczych, tym dokładniej będzie odwzorowane złożo w modelu. Kolejnym aspektem mającym wpływ na dokładność tworzonego modelu jest rozmieszczenie siatki danych z otworów wiertniczych w płaszczyźnie X,Y. Zdarza się bowiem dość często sytuacja, kiedy odległość między otworami jest na tyle duża, że problemem staje się interpolacja danych między tymi punktami. W takim przypadku pozioma zmienność złoża będzie miała wpływ na wiarygodność modelu. Jeśli zmienność ta jest duża, a przedsiębiorcy zależy na pełnej użyteczności modelu, zalecane jest wykonanie odwiertów zagęszczających siatkę. Kiedy warunki ekonomiczno-finansowe uniemożliwiają zastosowanie takiego rozwiązania, stosowane są techniki komputerowe, pozwalające nie tyle na zwiększenie dokładności modelu, co na uniknięcie miejsc pustych, tj. nieobjętych estymacją żadnego z parametrów. Miejsca takie mogą wystąpić, jeśli centra elipsoidy obliczeniowej dwóch punktów danych są oddalone od siebie o odległość większą

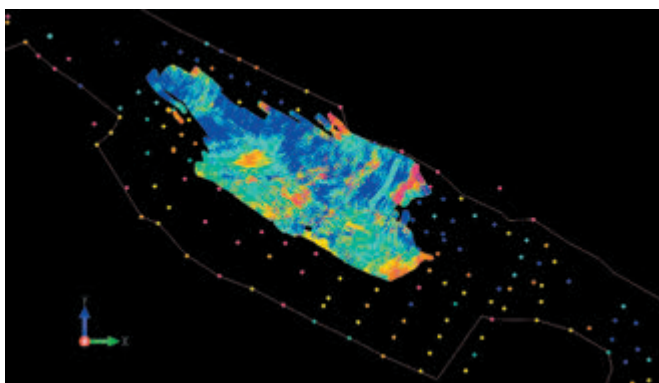
niż suma ich promieni. W takim przypadku, promień elipsoidy należy zwiększyć, tak aby objął swoim zasięgiem puste miejsca. Eliminacja pustych obszarów w modelu jest konieczna dla każdego z parametrów, ponieważ model nie przyjmuje do obliczeń bloków, których nie obejmuje swoją elipsoidą choćby jeden z parametrów. Oczywiście operacja ta, nie wiąże się z poprawą jakościową modelu, gdyż model rozszerzany jest jedynie o dotychczas puste bloki obliczeniowe.

Uzupełnianie modelu danymi z otworów strzałowych

Częstą praktyką wśród kopalń surowców cementowych jest prowadzenie bieżących analiz chemicznych ze zwierein otworów strzałowych, w celu kontrolowania składu chemicznego surowca jeszcze przed odstrzałem oraz odpowiedniego dysponowania urobkiem. Każdy z otworów zostaje przed odstrzałem opróbowany, przeanalizowany, a siatka rozmieszczenia otworów strzałowych zmierzona przy pomocy urządzenia GPS. Pozyskany w ten sposób zestaw danych można wykorzystać, aby wzbogacić bazę modelu. Dane te są szczególnie przydatne w przypadku stwierdzenia poprawności obliczeń modelu. W teorii, bowiem, parametry obliczone przez model, powinny pokrywać się z danymi uzyskanymi w trakcie robót strzałowych. W praktyce, bardzo często występują różnice, zwłaszcza w partiach złoża zlokalizowanych między otworami geologicznymi, jednak w większości są one nieznaczne oraz wykazują stały trend, przez co często wykorzystywane są do korekcy pierwotnych modeli złoża. Programy takie jak m.in. QMS – MineCad pozwalają na uaktualnianie modelu w oparciu o dane z otworów strzałowych w prosty sposób, bez konieczności ingerencji w ustawienia obliczania – program automatycznie uzupełnia model o nowe dane.

Tworzenie długoterminowych planów wydobywczych

Ze względu na opisane wyżej komplikacje związane z mnogością kryteriów dla obliczania zasobów oraz parametrów wejściowych modelu, tworzenie tzw. Mining plan'ów dla złóż surowców cementowych opierane jest właściwie w całości na narzędziach do modelowania komputerowego. Rzecz jasna punktem wyjściowym tworzenia tego typu planu jest projekt zagospodarowania złoża, ważne jest więc, aby on sam przedstawiał wartościowe i wiarygodne dane, w szczególności dotyczące zasobów kopaliny w złożu, tak więc już na etapie tworzenia PZZ'u wykonywany jest wstępny model złoża. W celu stworzenia dobrze funkcjonującego oraz realnego



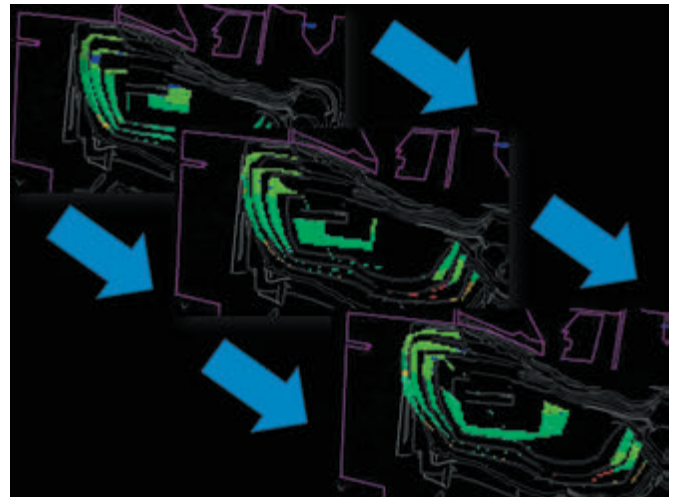
Rys. 6. Siatka otworów geologicznych uzupełniona chmurą danych z otworów strzałowych w programie QMS-Minecad, na przykładzie złoża wapieni i margli jurajskich Barcin-Piechcin-Pakość

Fig. 6. Geological drill holes grid densified with the data cloud from blast holes in the QMS-Minecad - Barcin-Piechcin-Pakość jurassic limestone and marl deposit

mining planu na wstępie należy zrewidować w jaki sposób rozkładają się różnice między składem chemicznym urobku i gotowych produktów. Różnice te mogą dochodzić nawet do 30 %, dla niektórych produktów, a z punktu widzenia mining plan'u, oszacowanie parametrów chemicznych dla produktów jest ważniejsze niż dla kopaliny w złożu czy w urobku, i to dla nich oblicza się bazę zasobową. Warto więc dołożyć starań, aby zbadać te zmienności oraz skorygować o nie model złoża, przed rozpoczęciem jakichkolwiek obliczeń. Następnym etapem, w którym wsparcie narzędzi do komputerowego modelowania złóż jest niemal konieczne jest obliczenie zasobów gotowych produktów w złożu oraz rozplanowanie potrzeb wydobywczych na kolejne lata życia kopalni. O ile to pierwsze obliczenie wykonuje się według aktualnych potrzeb lub najbliższych prognoz sprzedażowych tylko raz, kalkulacja sprecyzowanych ilości surowca o ściśle określonych parametrach, wydobywanego w poszczególnych okresach obliczeniowych, jest na wstępie, można by rzec, intuicyjna i wymaga wielu przeliczeń iteracyjnych.

Podsumowanie

Zaprezentowane w niniejszym artykule zagadnienia stanowią zaledwie namiastkę problematyki związanej z modelowaniem złóż. Mnogość zagadnień w tej dziedzinie przyczyniła



Rys. 7. Planowanie wydobycia rok po roku w programie Geovia Surpac [5]
Fig. 7. Year by year extraction plan, made in Geovia Surpac [5]

się do powstania wielu rozbudowanych narzędzi o bardzo dużych możliwościach. Korzystanie z nich bardzo ułatwia pracę związaną z geologiczną obsługą kopalń, pod warunkiem, pamiętamy o tym, że to tylko narzędzia, które same w sobie nie rozwiązują problemów, a jedynie realizują rozwiązania podsunęte przez ich użytkowników.

Literatura

- [1] Ostreǵa A., Mucha J., Wasilewska-Błaszczuk M. *Jakościowy model 3D złoża wapieni i margli jurajskich w obszarze Barcin-Piechcin*. AGH, 2012
- [2] Nowakowski M., Szczepanowski R. *Dodatek nr 1 do dokumentacji geologicznej złoża kruszywa naturalnego „Gliśno 3” w kat. CI*. Lafarge, 2010
- [3] Garczarek J., *Mining Plan Gliśno 3*. Lafarge, 2014
- [4] Chudzik W., Garczarek J. *Mining Plan Kowala Mała*. Lafarge, 2014
- [5] Chudzik W., Czarnomski M., Garczarek J. *Mining Plan Kujawy*. Lafargeholcim 2016