

Jacek MUCHA*,
Monika WASILEWSKA-BŁASZCZYK**

Wybrane problemy ewidencjonowania ruchu i stanu zasobów złóż wapieni

Streszczenie: Przedstawiono zalety i wady modelowania i szacowania zasobów złóż wapieni metodami tradycyjnymi i geostatystycznymi 3D. Skomentowano obowiązujące w Polsce wymagania dotyczące dokładności szacowania zasobów złóż na tle prognozowanych (teoretycznych) błędów oszacowań zasobów wapieni i sposobu zapisu wielkości ich zasobów. Stwierdzono, że notacja wielkości zasobów w różnego rodzaju dokumentach nie jest właściwa, gdyż nie odzwierciedla dokładności ich oszacowań. Zaproponowano wykazywanie wielkości zaktualizowanych zasobów złóż wapieni w corocznych bilansach zasobów złóż kopalin z dokładnością do 100 tys. ton oraz w operatach ewidencyjnych z dokładnością do 1 tys. ton.

Słowa kluczowe: wapienie, zasoby, geostatystyka, dokładność, ewidencja

Selected problems of the recording of change and state of limestone deposit resources

Abstract: The advantages and disadvantages of modelling and estimation of limestone deposit resources with traditional and geostatistical methods were presented. Current Polish requirements concerning the accuracy of deposit resources assessment related to predicted (theoretical) errors of limestone resources assessment were commented. It was stated that the notation of the amount of resources recorded in different documents is not correct, because it does not reflect the accuracy of resources assessment. The notation of the amount of updated limestone resources in annual register of mineral deposits in Poland accurate to within 100,000 metric tons and in annual resources reports accurate to within 1,000 metric tons, was proposed.

Key words: limestones, resources, geostatistics, accuracy, registration

* Dr hab. inż., prof. AGH, ** Dr inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Katedra Geologii Złożowej i Górniczej, Kraków.

Wprowadzenie

Ruch zasobów kopaliny rozumiany jako zmiana ich wielkości w pewnym przedziale czasowym (najczęściej rocznym) może być spowodowany: eksploatacją złoża i związanymi z nią stratami, dokładniejszym rozpoznaniem złoża, zmianą granic lub podziałem złoża, wymaganiami ochrony środowiska lub bezpieczeństwa pracy lub przeklasyfikowaniem różnych rodzajów zasobów (PGG 2011). Ustalone przez geologa górniczego ubytki lub przyrosty zasobów wynikające z wymienionych czynników są podstawą aktualizacji stanu zasobów rejestrowanego w sporządzanych corocznie operatach ewidencyjnych dołączanych do dokumentacji geologicznych i projektów zagospodarowania złoża (PZZ). Globalne wielkości stanu zasobów w rozbiciu na ich rodzaje i kategorie są następnie zamieszczane po uzyskaniu akceptacji Ministra Środowiska w ogólnokrajowym bilansie zasobów złóż kopalin w Polsce, opracowywanym przez Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy jako zadanie państwowej służby geologicznej.

W niniejszym artykule skoncentrowano się wyłącznie na wybranych aspektach ewidencjonowania ruchu zasobów wapieni związanego z ubytkiem kopaliny w wyniku wydobycia oraz dokładnością szacowania zasobów wapieni.

1. Modelowanie złóż metodami tradycyjnymi i geostatystycznymi 3D jako podstawa szacowania i rozliczania zasobów

Do modelowania i szacowania złóż wapieni i innych kopalin skalnych (piasków, żwirów) w dokumentacjach geologicznych stosuje się najczęściej tradycyjne metody przekrojów geologicznych i wieloboków. Metoda przekrojów pomimo swoich pewnych zalet jest niejednoznaczna. Przebiegi granic złoża, a w szczególności wydzielanych z reguły kompleksów surowcowych ilustrowane na mapach i przekrojach mogą znacznie się różnić w zależności od interpretacji dokumentatora. Fakt ten utrudnia właściwą prognozę zasobów i szczególnie jakości kopaliny w partiach przeznaczonych do eksploatacji. Jeszcze mniej wiarygodną chociaż jednoznaczną metodą szacowania zasobów jest metoda wieloboków, która w zasadzie powinna być stosowana jedynie przy silnie zaznaczonym składniku nielosowym zmienności zasobności i niewielkiej zmienności zasobności kopaliny.

Obie te metody nie pozwalają na predykcję wielkości błędów oszacowań zasobów kopaliny, które w odniesieniu do niewielkich fragmentów przestrzeni złożowej przewidzianych do wydobycia w krótkim okresie czasu mogą być znaczące.

Poprawniejsze wyniki szacowania zasobów można osiągnąć, opierając się na wynikach modelowania przestrzennego złoża dokonanego z zastosowaniem interpolatorów deterministycznych lub geostatystycznych. Interpolatory deterministyczne (np. z wagowaniem na odwrotność odległości) nie wykorzystują jednak informacji o strukturze zmienności parametrów zasobowych lub jakościowych i w praktyce nie pozwalają na teoretyczną prognozę wielkości błędów oszacowań zasobów i jakości kopaliny. Tych wad pozbawione są metody geostatystyczne 3D oparte na procedurze krigingu. Dysponując modelem złoża skonstruowanym przy zastosowaniu krigingu 3D, można komputerowo szybko określić zasoby i jakość kopaliny w dowolnym fragmencie złoża, co nie jest możliwe przy stosowaniu klasycznych (tradycyjnych) metod szacowania zasobów. Geostatystyczna metoda 3D, pomimo że

sama obarczona błędem, na tle innych metod cechuje się wyższą dokładnością oszacowania zasobów i jakości kopaliny w partiach złoża o dowolnych rozmiarach i kształtach (np. projektowanych blokach eksploatacyjnych) oraz umożliwia ocenę błędów dokonanych oszacowań. Metoda ta uwzględnia strukturę zmienności parametrów złoża (za pomocą modelu semiwariogramu), wzajemne położenie punktów rozpoznania (prób) względem siebie i względem partii złoża dla której szacuje się zasoby oraz wielkość i geometrię szacowanej partii złoża. Szacowanie odbywa się na podstawie algorytmu średniej ważonej gwarantującej minimalizację błędu oszacowania, co stanowi zasadniczy postulat geostatystycznej procedury krigingu zwyczajnego. Jednostką elementarną szacowania zasobów i jakości kopaliny są z reguły niewielkie prostopadłościennne fragmenty złoża (zwane miniblokami lub komórkami elementarnymi). Dobór właściwych rozmiarów minibloków uzależniony jest od struktury zmienności reprezentatywnego parametru złożowego (im silniej zaznaczony składnik losowy, tym wielkość minibloków powinna być większa) i rozstawu punktów rozpoznania (większe minibloki w przypadku rzadszej sieci rozpoznania złoża). Zbiór wszystkich takich minibloków w obrębie przestrzeni udokumentowania złoża z przypisanymi im, uśrednionymi odpowiednio parametrami jakościowymi, tworzy mozaikowy, przestrzenny model jakościowy złoża 3D. Obliczenie zasobów złoża lub wyróżnionych kompleksów litologicznych w dowolnych bryłach przestrzeni złożowej odbywa się przez zsumowanie zasobów minibloków, których centra znalazły się w obrębie tych brył. Szerzej zasady geostatystycznego modelowania 3D przedstawiono w artykule Muchy i Wasilewskiej-Błaszczak (2010).

Podstawowymi zaletami oszacowania zasobów opartego na modelowaniu geostatystycznym złoża 3D są:

- bardziej precyzyjne oszacowanie zasobów kopaliny, w tym zasobów wydzielonych w dokumentacji geologicznej kompleksów surowcowych oraz określenia stanu zasobów po kolejnych okresach eksploatacji,
- ułatwienie racjonalnej gospodarki złożem poprzez stworzenie możliwości szybkiego szacowania zasobów dla partii złoża o dowolnej geometrii i wielkości (np. dla elementarnych jednostek wydobywczych),
- ułatwienie właściwego planowania wydobycia i prognozowania jakości urobku,
- ułatwienie rozliczania zasobów w operatach ewidencyjnych.
- Pomimo że same oszacowania obarczone są również pewnym błędem (teoretycznie mniejszym niż przy użyciu innych metod), to metody te można uznać za jednoznaczne w tym sensie, że ustalenie tego samego modelu struktury zmienności i tych samych ustawień obliczeń (sposobu doboru próbek w algorytmie średniej ważonej) prowadzi do uzyskania identycznych wyników.

Z oczywistych względów modele złoża skonstruowane na bazie metod tradycyjnych i geostatystycznych 3D wykazują w zależności od cech zmienności parametrów zasobowych mniejsze lub większe różnice. Zilustrowano je przykładami modeli jednego ze złóż wapieni (rys. 1) i złoża piasku towarzyszącemu złożu wapieni (rys. 2).

Na marginesie rozpatrywanego zagadnienia można zarekomendować celowość konstruowania modeli jakościowych (np. zawartości CaO) dla parametrów uśrednionych w obrębie planowanych pięter eksploatacyjnych (rys. 3). Ułatwiają one projektantowi górnictwu prognozowanie jakości urobku w kolejnych etapach eksploatacji oraz przygotowanie optymalnego scenariusza eksploatacji.

2. Dokładność szacowania zasobów

Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska w sprawie dokumentacji geologicznej złoża kopaliny (2011) dopuszczalne wartości błędu oszacowania średnich wartości parametrów złoża i zasobów nie mogą przekraczać dla kategorii stopnia zbadania B, C₁ i C₂ odpowiednio 40%, 30% i 20%, natomiast dla kategorii A błąd oszacowania średnich wartości parametrów złoża i zasobów w poszczególnych blokach nie może przekraczać 10%. Szacowanie tych wielkości zgodnie z zaleceniami zawartymi w *Zasadach dokumentowania zasobów złóż kopalin stałych* (Nieć red., 2002) może być wykonane przy zastosowaniu metod statystycznych lub geostatystycznych dla poziomu prawdopodobieństwa 0,95.

W odniesieniu do kopalin skalnych dokładność oszacowania zasobów w skali całego udokumentowanego złoża prawie zawsze spełnia wymagania zawarte w cytowanym rozporządzeniu. Mniej optymistyczna z punktu widzenia dokładności oszacowań jest ocena zasobów w wydzielonych w dokumentacji geologicznej blokach obliczeniowych. Kierując się powszechnie akceptowaną zasadą regresu dokładności rozpoznania (rys. 4), można stwierdzić, że błąd oszacowania zasobów i średnich wartości parametrów w podobszarach udokumentowanego złoża będzie większy niż w całym obszarze złoża. W praktyce wielkości tych błędów nie wyznacza się w dokumentacjach geologicznych, a jedynie w opracowaniach o charakterze naukowo-badawczym. Rzadko określa się również analogiczne błędy dla całego złoża.

Przykładowo w jednym ze złóż wapieni błąd oszacowania zasobów określony metodą geostatystyczną (dla poziomu prawdopodobieństwa $P = 0,95$) w granicach całego udokumentowanego złoża w kategorii B wynosi 7,6% a w kategorii C₂ wynosi 13,8% (rys. 4). W obrębie wydzielonych w dokumentacji geologicznej bloków obliczeniowych są one większe i wynoszą od 8,8 do 10,4 % w kategorii B i aż od 19,8 do 38,0 % w kategorii C₂ (rys. 4). Znacznie większe wartości błędów w blokach kategorii C₂ wynikają z mniejszej liczby punktów rozpoznania. Można przypuszczać, że błąd oszacowania zasobów w niewielkich częściach tych bloków będzie jeszcze bardziej znaczący.

3. Rejestracja oszacowanych wielkości zasobów wapieni

W operatach ewidencyjnych zasobów złóż kopalin stałych zestawia się wielkości zaktualizowanych zasobów bilansowych, pozabilansowych, przemysłowych i nieprzemysłowych oraz strat eksploatacyjnych według stanu na dzień 31 grudnia poprzedniego roku. Dla potrzeb sporządzenia bilansu zasobów złóż kopalin w Polsce przedsiębiorcy przekazują dane o wielkości poszczególnych rodzajów zasobów (np. złóż wapieni, piasków i żwirów) w tysiącach ton, do drugiego miejsca po przecinku (z dokładnością do 10 ton). W samym bilansie zasobów złóż wyniki zaokrągla się i zapisuje się z dokładnością do 1 tys. ton.

Przy założeniu, że w okresie rozliczeniowym wystąpiły jedynie zmiany zasobów spowodowane wydobywaniem kopaliny i stratami, aktualizacja stanu zasobów następuje przez odjęcie ubytków zasobów od stanu tych zasobów ustalonego w poprzednim operacie ewidencyjnym. W operatach ewidencyjnych aktualizacji dokonuje się jedynie w odniesieniu do całego złoża z rozbięciem na stopnie zbadania złoża, a nie dla wydzielonych w dokumentacji geologicznej i PZZ bloków obliczeniowych zasobów kopaliny. Fakt ten stanowi niekiedy poważną

trudność przy sporządzaniu dodatku do PZZ lub opracowania nowego PZZ. Zdarza się bowiem w sporadycznych przypadkach, że po zaktualizowaniu zasobów w blokach obliczeniowych stwierdza się od wielu lat brak zasobów, co jest konsekwencją ograniczonej dokładności szacowania.

Ubytki zasobów określa się na podstawie wyników obmiaru geodezyjnego wyrobisk eksploatacyjnych. Ich wielkość podaje się z dokładnością do 1 tony, co jest poniekąd zrozumiałe zważywszy na stosunkowo wysoką dokładność pomiarów, szczególnie na tle wielokrotnie mniejszej dokładności oszacowania zasobów.

Wysoka dokładność pomiaru ubytków nie ma żadnego wpływu na dokładność zaktualizowanego stanu zasobów, która jest równa lub bardzo zbliżona do dokładności pierwotnego oszacowania zasobów w złożu lub jego częściach odpowiadających np. blokom obliczeniowym. W tej sytuacji niecelowa wydaje się praktyka podawania w bilansie zasobów złóż kopaliny stałych wielkości zasobów wapieni i innych kopaliny skalnych z dokładnością do dziesiątków ton, co stwarza złudne i niczym nieuzasadnione pozory wysokiej dokładności oszacowań. Zagadnienie to znalazło wyraz w zaleceniach zawartych w australijskim systemie raportowania zasobów JORC Code (2012, według których liczby charakteryzujące wielkość zasobów (bilansowych) powinny odzwierciedlać relatywny błąd ich oszacowania przez zaokrąglenie ich do odpowiedniej liczby cyfr znaczących. Proponuje się podawanie zasobów do 2 miejsc znaczących, a w przypadku zasobów najniższej kategorii (*Inferred Mineral Resources*) nawet do pierwszej cyfry znaczącej. Przykładowo oszacowaną wielkość zasobów 10 863 000 ton powinna być według wytycznych JORC Code po zaokrągleniu zapisywana jako 11 000 000 ton.

Zgodnie z zasadami działania na liczbach przybliżonych oraz zaokrąglenia wyników wartość liczbowa wyniku pomiaru lub obliczenia powinna zawierać taką liczbę cyfr znaczących, aby tylko ostatnia cyfra była niepewna. Miejsce tej cyfry określa błąd bezwzględny. Przez cyfry znaczące uważa się cyfry rozwinięcia dziesiętnego mierzonej wielkości fizycznej, począwszy od pierwszej cyfry niezerowej aż do ostatniej cyfry, której wartość nie zmienia się wewnątrz przyjętego przedziału ufności.

Dla zilustrowania tego zagadnienia przyjęto, że oszacowane zasoby hipotetycznego złoża wapieni wynoszą 105 567,24 tys. ton, przy czym prognozowany metodą statystyczną błąd oszacowania zasobów dla poziomu prawdopodobieństwa $P = 0,95$ wynosi 4%, to jest w wielkościach bezwzględnych 3 139,18 tys. ton. Przedział ufności dla prawdziwej, nieznannej wielkości zasobów określają wartości skrajne: [101 344,55–109 789,93] tys. ton. Jak widać, tylko dwie pierwsze cyfry powtarzają się w liczbach wyznaczających granice przedziałów ufności oraz oszacowane zasoby i mogą być uznane za cyfry znaczące. Zgodnie z podaną wcześniej zasadą notowania liczby do pierwszej cyfry niepewnej wielkość zasobów należałoby zapisać (po zaokrągleniu) jako 106 mln ton, a uwzględniając błąd bezwzględny (po zaokrągleniu w górę) jako 106 ± 4 mln ton.

W przypadku pojedynczego bloku obliczeniowego o oszacowanych zasobach w ilości 15 236,16 tys. ton z błędem 10% (tzn. z błędem bezwzględnym 1 523,62 tys. ton) przedział ufności wyznaczają liczby: [13 712,54–16 759,78] tys. ton. Oznacza to, że właściwym oszacowaniem zasobów jest zaokrąglona liczba 15 mln ton. Zakładając, że wydobycie kopaliny z tego bloku w ciągu 1 roku wyniosło 210,234 tys. ton, a straty 5,533 tys. ton, formalnie obliczone zasoby zaktualizowane po rocznym wydobyciu wynoszą: $15 236,16 - 210,234 - 5,533$ [tys. ton] = $15 020,39$ [tys. ton], co po zaokrągleniu do 2 cyfr znaczących

daje ponownie wielkość 15 mln ton. Przy zbliżonych wielkościach ubytków zasobów w kolejnych latach eksploatacji oraz powszechnie stosowanych zasadach zaokrągleń wyników liczbowych może to prowadzić do pewnego rodzaju paradoksu polegającego na niezmienności stanu aktualizowanych zasobów w pojedynczych blokach. Kwestia ta w nieco mniejszym stopniu dotyczy aktualizacji zasobów w skali całego złoża, gdyż sumaryczna eksploatacja kopaliny w okresie jednego roku z reguły przekracza 1 mln ton. Problem rozliczania zasobów komplikuje się, gdy przedmiotem aktualizacji są zasoby poszczególnych kompleksów surowcowych wydzielanych w złożach wapieni, z uwagi na mniejszą dokładność ich szacowania w złożu oraz znacznie mniejszą dokładność określenia wielkości ich wydobycia. Ilościowego oszacowania wielkości wydobycia poszczególnych kompleksów surowcowych dokonuje się na podstawie modeli złoża. W tym przypadku modele tradycyjne dają niewspółmiernie gorsze rezultaty niż geostatystyczna metoda 3D.

Dla uniknięcia trudności racjonalnego ewidencjonowaniu zasobów konieczne jest przyjęcie pewnego kompromisu między zasadami działań na liczbach przybliżonych oraz zasadami rozliczania zasobów. Wydaje się, że możliwa do zaakceptowania jest propozycja zapisu wielkości wydobycia oraz strat z dokładnością do 1 tys. ton, a zaktualizowanego stanu zasobów kopalin skalnych rejestrowanego w bilansie zasobów złóż kopalin stałych z dokładnością do 100 tys. ton.

Podsumowanie

Trudności związane z właściwą notacją zasobów złóż wapieni w trakcie ich corocznej aktualizacji wynikają ze zróżnicowanego rzędu wielkości zasobów *in situ* i ich ubytku wskutek eksploatacji oraz silnie zróżnicowanych dokładności oszacowania tych wielkości.

Dotychczasowa praktyka zapisu stanu aktualizowanych zasobów nie jest optymalna, gdyż nie uwzględnia stopnia niepewności ich oszacowań.

Próba pogodzenia obecnych realiów rozliczania i ewidencjonowania zasobów z zasadami działań na liczbach przybliżonych oraz zaokrągleń wyników prowadzi do konkluzji, że wystarczającą dokładnością zapisu ich wielkości w operatach ewidencyjnych jest 1 tys. ton, natomiast w publikowanych corocznie bilansach zasobów złóż kopalin stałych 100 tys. ton. Przedstawiona propozycja powinna być przedmiotem dalszych dyskusji i praktycznej weryfikacji.

Praca wykonana w ramach badań statutowych AGH WGGiOŚ nr 11.11.140.320.

Literatura

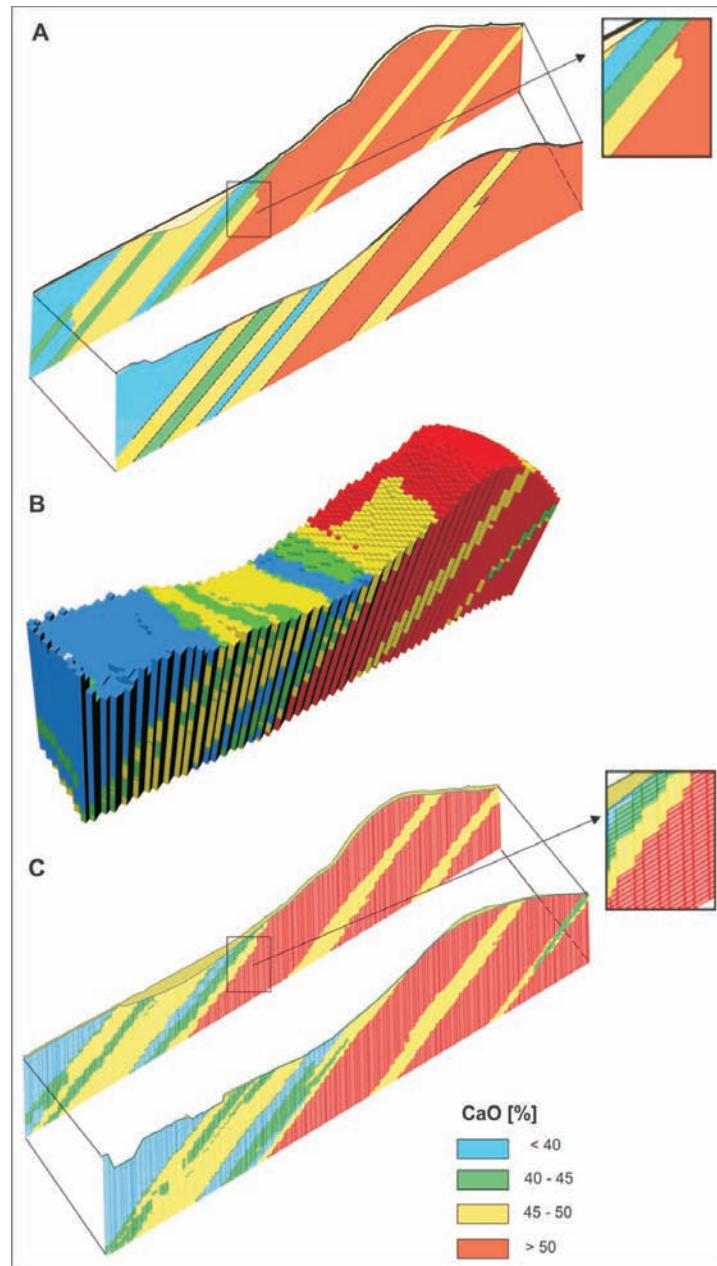
- Bilans Zasobów Złóż Kopalin w Polsce wg stanu na 31 XII 2013 r. Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa 2014.
- Mucha, J. i Wasilewska-Błaszczak, M. 2010. Prognoza jakości urobku metodami geostatystyki 3D – perspektywy i ograniczenia. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* t. 26, z. 2, s. 57–67.
- Nieć, M. red. 2002. *Zasady dokumentowania złóż kopalin stałych*. Kraków: Wyd. Patria, 40 s.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 15 listopada 2011 r. w sprawie operatu ewidencyjnego oraz wzorów informacji o zmianach zasobów złoża kopaliny (Dz.U.2011.262.1568).

Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 22 grudnia 2011 r. w sprawie dokumentacji geologicznej złoża kopaliny (Dz.U.2011.291.1712).

Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 kwietnia 2012 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących projektów zagospodarowania złóż (Dz.U.2012.511).

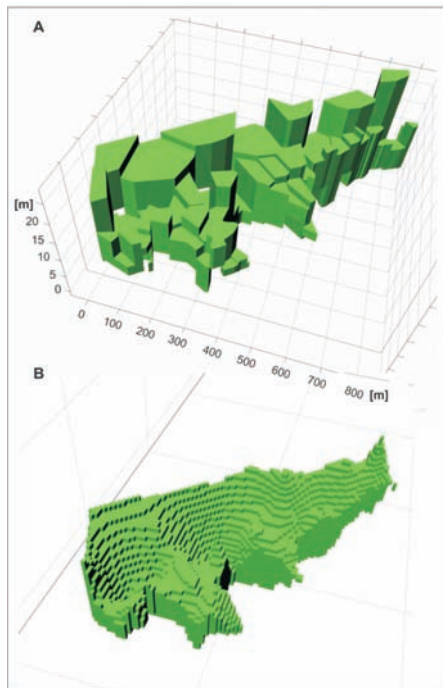
The JORC Code 2012 Edition Effective 20 December 2012 and mandatory from 1 December 2013, Prepared by the Joint Ore Reserves Committee of The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Australian Institute of Geoscientists and Minerals Council of Australia (JORC).

Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r. Prawo geologiczne i górnicze (Dz.U.2011.163.981).



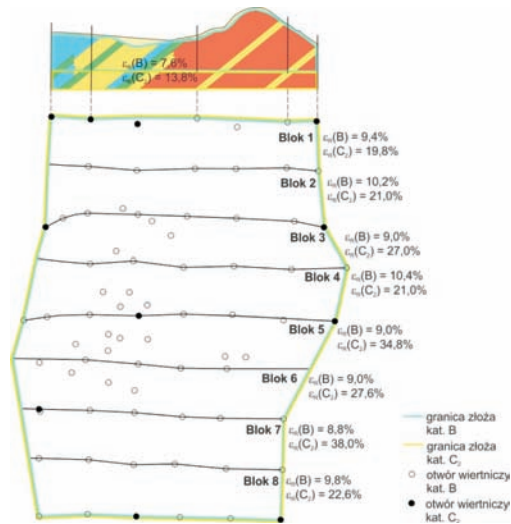
Rys. 1. Przykłady modeli jednego ze złóż wapieni w obrębie pojedynczego bloku obliczeniowego;
 A) metoda przekrojów geologicznych, B) metoda geostatystyczna 3D, C) przekroje przez model geostatystyczny 3D

Fig. 1. The examples of models of limestone deposit within of a singular calculation block;
 A) geological cross-sectional model, B) geostatistical 3D model, C) cross-sections through the geostatistical 3D model



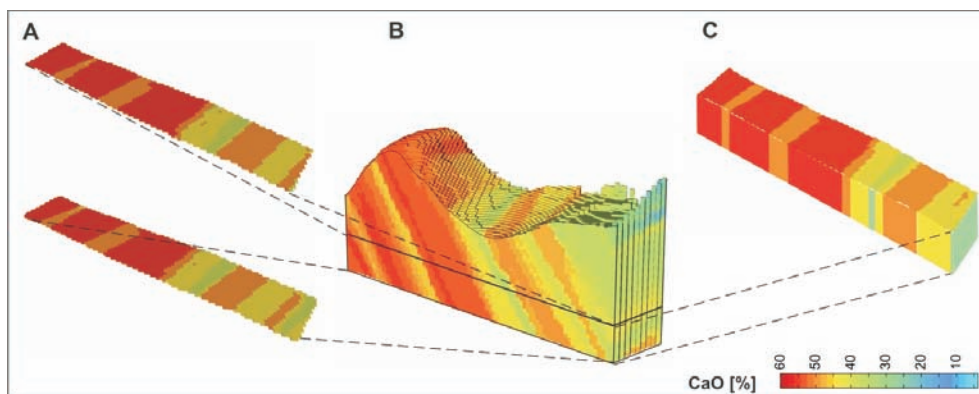
Rys. 2. Modele jednego ze złóż piasku uzyskane metodą wieloboków Bóldyriewa (A) i metodą geostatystyczną 3D (B)

Fig. 2. Models of the one of the sand deposit obtained using polygonal (A) and geostatistical (B) methods



Rys. 4. Ilustracja zasady regresu dokładności rozpoznania zasobów na przykładzie prognozowanych błędów oszacowania zasobów (dla $P=0,95$) w blokach obliczeniowych jednego ze złóż wapieni

Fig. 4. Schema of the principle of the resources accuracy regress on the example of projected resource estimation errors ($P=0,95$) within of the calculation blocks of the some Polish limestone deposit



Rys. 3. Model geostatystyczny fragmentu złoża wapieni w obrębie jednego z bloków obliczeniowych A – mapy stropu i spągu poziomu eksploatacyjnego, B – model mozaikowy 3D, C – model dla uśrednionych w pionie zawartości CaO [%]

Fig. 3. Geostatistical model of the part of the one of limestone deposit within the calculation block