

**Artykuł został opublikowany w materiałach konferencyjnych  
VII Krajowego Zjazdu Górnictwa Odkrywkowego,  
który odbył się we Wrocławiu w 2000r.**

*Analizy opłacalności, NPV, IRR, projektowanie kopalń  
optymalizacja, metoda ruchomych stożków,  
algorytm Lerchs'a-Grossmann'a, planowanie długoterminowe.*

**Leszek JURDZIAK\***

**NA CZYM POLEGA EKONOMICZNA OPTIMALIZACJA  
KOPALŃ ODKRYWKOWYCH ?**

Programy do optymalizacji kopalń odkrywkowych są na świecie powszechnie stosowane od piętnastu lat, a więc niewiele dłużej niż obowiązują u nas zasady ekonomii rynkowej. Pomimo tego nie zdobyły u nas popularności. Jedną z przyczyn oporów przed zastosowaniem komputerów do tych celów należy upatrywać w braku upowszechnienia wiedzy na ten temat. Lukę tą stara się wypełnić niniejszy artykuł. Omówiono w nim zasady analizy opłacalności inwestycji i stosowane na świecie metody oparte na dyskontowanych przepływach pieniężnych. Na prostych przykładach wprowadzono szereg pojęć stosowanych w programach optymalizacyjnych (firmy Whittle i Earthworks Corp.) takich jak: odkrywka docelowa, fazy, kolejność wydobycia, odkrywka optymalna i etapy pośrednie pokazując jak zmienia się wartość kopalni w zależności od różnie przyjętej kolejności wydobycia. Omówiono również zasady algorytmu Lerchs'a-Grossmann'a oraz algorytmu „ruchomych stożków” i zademonstrowano różnice. Pokazano również możliwości dostępnych na rynku programów Whittle 3D i 4D oraz MaxiPit oraz omówiono dalsze możliwości optymalizacji harmonogramu wydobycia w programie NPVScheduler 2 i Mine Flow.

**1. WPROWADZENIE**

Programy do optymalizacji kopalń odkrywkowych są na świecie powszechnie stosowane od piętnastu lat, a więc niewiele dłużej niż obowiązują u nas zasady ekonomii rynkowej. Pomimo tego nie zdobyły u nas popularności, choć dzięki zastosowaniu tu i ówdzie w górnictwie komputerów można by je z powodzeniem wykorzystać. Tym bardziej, że obecnie otwierają się perspektywy dla tego rodzaju analiz. Trwają prace nad odkrywką „Szczerców”, KGHM „Polska Miedź” S.A. inwestuje w zamorskie kopalnie odkrywkowe, a większość kopalń odkrywkowych w

---

\* Instytut Górnictwa Politechniki Wrocławskiej, ul. Teatralna 2, 50-051 Wrocław,  
[leszek.jurdziak@pwr.wroc.pl](mailto:leszek.jurdziak@pwr.wroc.pl)

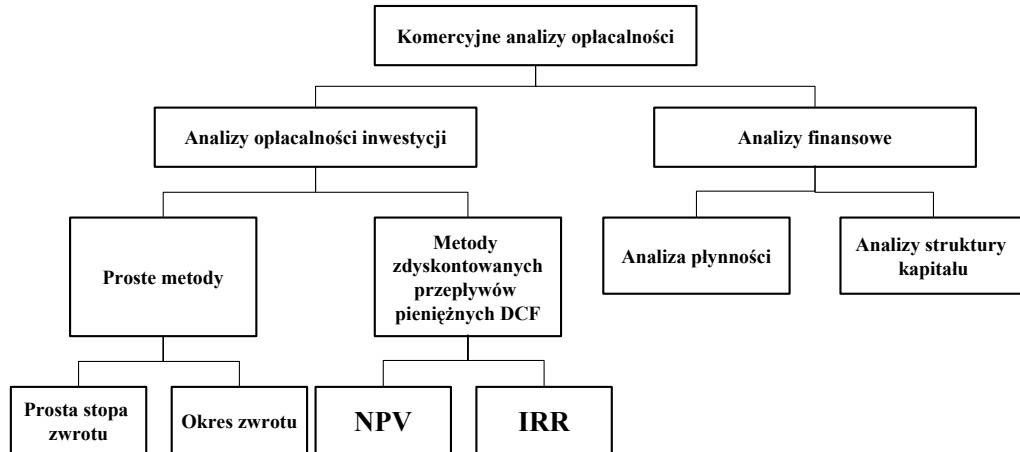
**Artykuł został opublikowany w materiałach konferencyjnych  
VII Krajowego Zjazdu Górnictwa Odkrywkowego,  
który odbył się we Wrocławiu w 2000r.**

Polsce została już sprywatyzowana i właścicielom powinno zależeć na maksymalizacji ich wartości. Jedną z przyczyn oporów przed zastosowaniem komputerów do tych celów należy upatrywać w braku upowszechnienia wiedzy na ten temat. Lukę tą stara się wypełnić niniejszy artykuł.

## 2. EKONOMICZNA OCENA PRZEDSIĘWZIĘĆ INWESTYCYJNYCH W GÓRNICTWIE

W dobie gospodarki rynkowej decyzja o realizacji przedsięwzięcia górniczego (np. nowej kopalni) musi być oparta na ocenie jego opłacalności [9]. Projekty o najwyższej opłacalności mają największą szansę na realizację. Większość współczesnych metod oceny opłacalności wykorzystuje zmienną wartość pieniądza w czasie (time value of money) i opiera się na analizie dyskontowanych przepływów pieniężnych [25].

Przedsięwzięcia górniczne najczęściej oceniane są poprzez obliczenie wartości aktualnej netto całego przedsięwzięcia (metoda NPV – Net Present Value) lub wyznaczenie wewnętrznej stopy zwrotu IRR (Internal Rate of Return). Czasami, przy mniejszych i prostszych przedsięwzięciach używa się prostszych metod: okresu zwrotu (payback period) i prostej stopy zwrotu (rys.1) [9, 14, 19, 25].



Rys.1 Najpowszechniejsze metody oceny opłacalności inwestycji [20].  
Fig. 1 The most common evaluation of investment profitability methods [20]

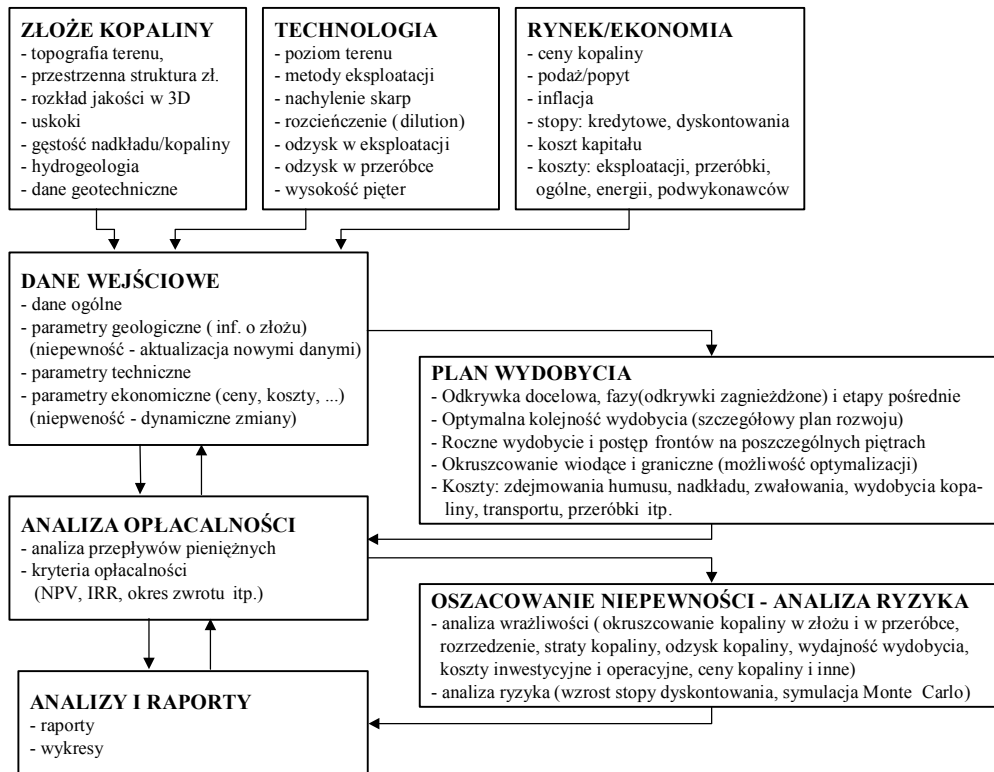
W pracy [2] opublikowano wyniki ankiety na temat stosowanych metod do oceny opłacalności inwestycji górnich przeprowadzonej pośród 20 kompani górniczych. Pośród nich było 9 firm zajmujących się produkcją złota, 5 wydobywaniem miedzi, 3 eksploatacją rudy żelaza, jedna wydobywaniem talku i dwie o zróżnicowanym profilu produkcji. Z ankiety wynika, że 95% z nich wykorzystuje jakąś formę analizy zdyskontowanych przepływów pieniężnych (DCF). Zazwyczaj była to kombinacja

**Artykuł został opublikowany w materiałach konferencyjnych  
VII Krajowego Zjazdu Górnictwa Odkrywkowego,  
który odbył się we Wrocławiu w 2000r.**

wewnętrznej stopy zwrotu (IRR), wartości bieżącej netto (NPV) i okresu zwrotu. Metody te są w powszechnym użyciu na międzynarodowym rynku górnictwa.

Ocena przedsięwzięcia górnictwa rozpoczyna się zazwyczaj od złoża kopaliny użytecznej z oszacowanymi zasobami (przy użyciu metod konwencjonalnych lub geostatystyki). Wynikiem estymacji zasobów jest model blokowy złoża, w którym to złożo podzielone jest na regularne lub nieregularne komórki.

Informacje o złożu (dane geologiczne, geotechniczne i informacje o środowisku), dostępne technologie eksploatacji (parametry techniczne) oraz dane rynkowe (ekonomiczne) stanowią dane wejściowe do zaprojektowania kopalni i jej rozwoju oraz oceny analizowanego przedsięwzięcia górnictwa. Na ich podstawie przygotowywane są plany produkcyjne (wydobywcze), obliczane są niektóre wskaźniki opłacalności i oszacowywana jest niepewność wyznaczanych kryteriów (rys.2).



Rys. 2 Pojedynczy krok w ocenie przedsięwzięcia górnictwa [20].

Fig. 2 A single step in the evaluation of a mining project [20].

Analiza opłacalności prowadzona jest na podstawie przepływów pieniężnych w poszczególnych latach realizacji przedsięwzięcia. Wyznacza się je poprzez odjęcie od przychodów uzyskanych ze sprzedaży wydobytej w danym roku kopaliny użytecznej kosztów inwestycyjnych i operacyjnych. Pozwala to określić przepływy pieniężne

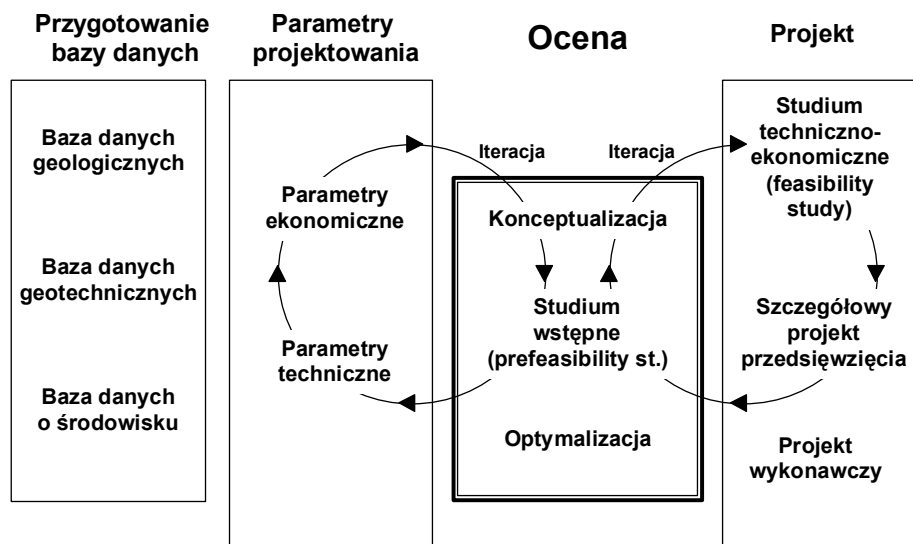
**Artykuł został opublikowany w materiałach konferencyjnych  
VII Krajowego Zjazdu Górnictwa Odkrywkowego,  
który odbył się we Wrocławiu w 2000r.**

netto i zdyskontowane przepływy netto niezbędne do wyznaczenia okresu zwrotu i kryteriów opłacalności.

Na podstawie zależności koszty-wydajność, danych o złożu, przychodów ze sprzedaży można poprzez wielokrotne przeliczenia (iteracje) lub zastosowanie optymalizacji dobrać właściwą wielkość wydobywania i opracować projekt kopalni (rys.3) zapewniający największą jej wartość. Konieczność wielokrotnego przeliczania różnych wariantów wynika ze skomplikowanych związków pomiędzy poszczególnymi etapami oceny i wzajemnych zależności pomiędzy kluczowymi parametrami: wartością brzeżną (okruszczeniem granicznym) lub wartością graniczną, a wydajnością wydobywania i kolejnością eksploatacji.

Posługiwanie się omówionymi wcześniej metodami analizy ekonomicznej efektywności inwestycji uwzględniającymi ryzyko przedsięwzięcia mogłoby się sprowadzić jedynie do odpowiednich rachunków, gdyby poszczególne parametry wejściowe w kryteriach oceny ekonomicznej były od siebie całkowicie niezależne. Niestety w przypadku inwestycji górniczych tak nie jest. Większość z czynników decydujących o opłacalności projektu jest ze sobą silnie powiązane (np. jakość surowca i zasoby) stąd każda realistyczna analiza finansowa powinna uwzględniać ich wzajemne zależności. Dotyczy to zwłaszcza parametrów geologiczno-technicznych, choć i w przypadku parametrów ekonomicznych można znaleźć takie zależności (np. wielkość produkcji, czyli podaż surowca i jego cena).

**Proces projektowania przedsięwzięcia inwestycyjnego (kopalni)**



Rys. 3 Dynamika powiązań parametrów i cykliczność procesu projektowego [4].  
Fig. 3 Dynamic connection between parameters and cyclical character of design process [4].

**Artykuł został opublikowany w materiałach konferencyjnych  
VII Krajowego Zjazdu Górnictwa Odkrywkowego,  
który odbył się we Wrocławiu w 2000r.**

Wprowadzić w niektórych nowszych programach do analizy finansowej przedsięwzięć górniczych można zadać współczynniki korelacji pomiędzy poszczególnymi parami zmiennych [9] to jednak zmiany wielu z istotnych parametrów wymagają ponownego rozpatrzenia przedsięwzięcia, powtórnego wykonania obliczeń dla innych danych lub wręcz zmianę koncepcji projektu. Dobrym przykładem może być tu ciąg zależności:

**cena surowca ⇒ opłacalne okruszcowanie graniczne (wartość brzeźna) ⇒  
⇒ wielkość zasobów ⇒ wielkość kopalni ⇒ koszty inwestycyjne ⇒  
⇒ wielkość produkcji ⇒ koszty operacyjne ⇒...⇒ NPV**

Ciąg ten nie może być dokładnie oddany poprzez podanie odpowiednich współczynników korelacji pomiędzy tymi parametrami. Tym bardziej, że wiele zależności ma charakter przestrzenno-geometryczny. Zmiana ceny surowca wpływa na zmianę wartości bloków z kopaliną użyteczną. W konsekwencji może się okazać, że po wzroście cen opłaca się wybrać obszary złoża traktowane wcześniej jako zbyt ubogie lub odwrotnie po obniżce cen, z niektórych obszarów powinniśmy zrezygnować, gdyż ich wybranie zwiększy tylko koszty. Cena kopaliny ma więc bezpośredni wpływ na kształt i wielkość kopalni. Po dobraniu technologii eksploatacji można określić koszty inwestycyjne związane z zakupem maszyn i udostępnieniem złoża oraz określić planowane roczne wydobycie.

Zarówno wybór miejsca udostępnienia jak i określenie kierunku i postępu rozwoju odkrywki (zadanie rocznego wydobycia) ma bezpośredni wpływ na ilość i jakość eksploatowanej kopaliny w poszczególnych latach jej rozwoju. Przestrzenny rozkład jakości kopaliny jest bowiem zazwyczaj nierównomierny i najmniejsza zmiana omawianych parametrów wpływa na zmianę ilości, jakości, a zatem i wartości eksploatowanego surowca. Przy ocenie opłacalności przedsięwzięcia nie można więc oprzeć się wyłącznie na arkuszu kalkulacyjnym lub programie finansowym przyjmującym najczęściej równomierną eksploatację surowca o uśrednionych parametrach, lecz należy przeprowadzić serię stosownych obliczeń przy użyciu zintegrowanego oprogramowania geologiczno-górniczego pozwalającego w pełni uchwycić i uwzględnić powiązania, w tym przestrzenno-geometryczne, pomiędzy przyjętymi parametrami, a nawet prowadzić optymalizację przedsięwzięcia górniczego (projektu nowej kopalni lub planów dalszego rozwoju już istniejącej).

### 3. WPROWADZENIE DO OPTYMALIZACJI KOPALŃ ODKRYWKOWYCH

Wyjaśnienie, na czym polega ekonomiczna optymalizacja kopalń odkrywkowych należy rozpocząć od uświadomienia sobie podstawowego celu działania firm

**Artykuł został opublikowany w materiałach konferencyjnych  
VII Krajowego Zjazdu Górnictwa Odkrywkowego,  
który odbył się we Wrocławiu w 2000r.**

górnictwych w gospodarce rynkowej. Tym celem, podobnie jak dla wszystkich innych firm działających na rynku, jest zysk. Nie zajmują się one działalnością górnictwem dla jakichś szczytnych idei społecznych, lecz dlatego, że akurat na tej działalności się najlepiej znają i potrafią efektywniej i z większym zyskiem niż konkurencja dostarczyć na rynek potrzebne surowce.

W związku z tym każda kopalnia odkrywkowa, a właściwie materiał we wnętrzu odkrywki docelowej, dla tych firm stanowi konkretną wartość finansową i powinny one dążyć do takiego określenia jej kształtu, by wartość jej była jak największa, aby móc maksymalizować zysk ze swej działalności.

Oczywiste jest, że kształt tej odkrywki musi zapewniać fizyczną możliwość wybrania materiału z jej wnętrza tzn. nachylenie skarp musi zapewniać bezpieczeństwo geotechniczne kopalni, spełniać wymogi technologiczne i inne ograniczenia (filary ochronne, nałożone granice rozwoju eksploatacji itp.).

Aby móc obliczyć wartość danej odkrywki potrzebne są dwie rzeczy. Pierwszą jest model wartościowy złoża – model blokowy, w którym każdej komórce przypisana jest jej wartość netto. Komórkom materiału nieużytecznego (w tym nadkładu) koszt ich wydobywania (mogący uwzględniać położenie bloku w przestrzeni i koszty transportu zależne od odległości), a komórkom zawierającym kopalinę użyteczną różnicę wartości zawartej kopaliny (jej części, którą można uzyskać w drodze eksploatacji i przeróbki) i kosztu jej wydobywania. Metody definiowania takich wartości są opisane w literaturze specjalistycznej np. [3, 11, 16]. Program optymalizacyjny NPV Scheduler może wykorzystać wartości bloków obliczone na zewnątrz (np. w systemie Datamine) lub wygenerować własne wartości na podstawie dostępnych informacji o cenach i kosztach. Przy wyznaczaniu wartości może być uwzględniona dowolna ilość produktów definiowanych przez użytkownika.

Drugą niezbędną rzeczą do prawidłowego wyznaczenia wartości kopalni jest kolejność wydobywania. Musi ona uwzględniać fizyczne ograniczenia wpływające na kolejność dostępu do poszczególnych komórek modelu np. komórki leżące niżej nie mogą być wybrane wcześniej niż leżące powyżej w obszarze stożka wynikającego z przyjętych nachyleń skarp oraz odzwierciedlać technologiczne i jakościowo-wartościowe wymogi eksploatacji.

Na prostym, dwuwymiarowym przykładzie wyjaśnione zostaną podstawowe pojęcia związane z optymalizacją odkrywek. Na rys. 4 mamy przekrój przez dwuwymiarowy model blokowy [21], w którym każdej komórce przypisano jej wartość. Wartość ujemna oznacza, że z danej komórki związany jest jedynie koszt jej wydobywania.

Model ten posłuży do zademonstrowania dwóch sekwencji wydobywania określających dolne i górne oszacowanie wartości NPV. Dla uproszczenia przyjmujemy, że dopuszczalny kąt nachylenia skarp odkrywki jest taki jak na rys.4.

**Artykuł został opublikowany w materiałach konferencyjnych  
VII Krajowego Zjazdu Górnictwa Odkrywkowego,  
który odbył się we Wrocławiu w 2000r.**

Pozwala to łatwo zaprojektować serię zagnieżdżonych odkrywek (faz, tu również stanów pośrednich - od P1 do P6 – czarna i biała linia na rys.4). W rzeczywistości proces ten jest przestrzenny i znacznie bardziej skomplikowany.

P6	P5	P4	P3	P2	P1	P2	P3	P4	P5	P6
-2	-2	-2	-2	4	7	4	-2	-2	-2	-2
-2	-2	-2	-2	4	7	4	-2	-2	-2	-2
-2	-2	-2	-2	4	7	4	-2	-2	-2	-2
-2	-2	-2	-2	4	7	4	-2	-2	-2	-2
-2	-2	-2	-2	4	7	4	-2	-2	-2	-2
-2	-2	-2	-2	4	7	4	-2	-2	-2	-2

Rys. 4 Dwuwymiarowy model blokowy wartości złoża

Fig. 4 The block model of the deposit value.

Dla danego modelu ekonomicznego złoża i wyróżnionych stanów pośrednich można zaprojektować wiele różnych sekwencji / kolejności wydobywania bloków. Każda sekwencja generuje przepływ pieniężny z indywidualnych bloków zgodnie z kolejnością ich wybierania.

P6	P5	P4	P3	P2	P1	P2	P3	P4	P5	P6
	1	3	5	7	9	8	6	4	2	
		10	12	14	16	15	13	11		
			17	19	21	20	18			
				22	24	23				
					25					

P6	P5	P4	P3	P2	P1	P2	P3	P4	P5	P6
	-1.90	-1.73	-1.57	2.84	4.51	2.71	-1.49	-1.65	-1.81	
		-1.23	-1.11	2.02	3.21	1.92	-1.06	-1.17		
			-0.87	1.58	2.51	1.51	-0.83			
				1.37	2.17	1.30				
					2.07					

Rys. 5 Sekwencja wydobywania – najgorszy przypadek.

Kolejność bloków (górze) i ich wartości po zdyskontowaniu wg założeń z tab.1 (dół).

Fig. 5 The sequence of excavation – the worst case

Sequence of blocks (upper) and their discounted values according to assumptions from tab.1 (lower)

**Artykuł został opublikowany w materiałach konferencyjnych  
VII Krajowego Zjazdu Górnictwa Odkrywkowego,  
który odbył się we Wrocławiu w 2000r.**

Jeśli określimy czas wybierania jednego bloku (zadamy wydajność wydobycia) i stopę dyskontowania to dla każdej sekwencji można podać jej wartość NPV. Pośród wielu możliwych sekwencji można wskazać dwie charakterystyczne: najgorszy i najlepszy przypadek.

**Najgorszy przypadek** jest to sekwencja wydobycia polegająca na całkowitym wyeksploatowaniu kolejnych pięter nim rozpocznie się eksploatacja piętra następnego - niższego. Taka kolejność przesuną moment eksploatacji kopaliny użytecznej na najdalszą, możliwą chwilę i dlatego daje dolne oszacowanie NPV (rys.5). Sekwencja taka jest możliwa do praktycznego zrealizowania.

P6	P5	P4	P3	P2	P1	P2	P3	P4	P5	P6
26	17	10	5	2	1	3	6	11	18	27
	28	19	12	7	4	8	13	20	29	
		30	21	14	9	15	22	31		
			32	23	16	24	33			
				34	25	35				
					36					

P6	P5	P4	P3	P2	P1	P2	P3	P4	P5	P6
-1.90	-0.87	-1.23	-1.57	3.63	6.67	3.46	-1.49	-1.17	-0.83	-0.54
	-0.51	-0.79	-1.11	2.84	5.76	2.71	-1.06	-0.75	-0.49	
		-0.46	-0.72	2.02	4.51	1.92	-0.68	-0.44		
			-0.42	1.30	3.21	1.24	-0.40			
				0.76	2.07	0.73				
					1.21					

Rys. 6 Sekwencja wydobycia – najlepszy przypadek.

Kolejność bloków (góra) i ich wartości po zdyskontowaniu wg założeń z tab.1 (dół).

Fig. 6 The sequence of excavation – the best case

Sequence of blocks (upper) and their discounted values according to assumptions from tab.1 (lower)

**Najlepszy przypadek** to sekwencja eksploatacji polegająca na wybraniu w całości jednej zagnieżdżonej odkrywki nim przejdzie się do eksploatacji następnej od najmniejszej do największej będącej odkrywką docelową. Sekwencja ta, chociaż zazwyczaj niemożliwa do fizycznej realizacji, daje górne oszacowanie wartości NPV (rys.6).

W tabeli 1 zawarto obliczenia wartości poszczególnych odkrywek (faz, stanów pośrednich) i to zarówno bez jak i z uwzględnieniem dyskontowania. Na podstawie danych w niej zawartych można wskazać zarówno odkrywkę docelową, jak i odkrywkę optymalną.

**Artykuł został opublikowany w materiałach konferencyjnych  
VII Krajowego Zjazdu Górnictwa Odkrywkowego,  
który odbył się we Wrocławiu w 2000r.**

**Odkrywka docelowa** (ultimate pit) jest to taka odkrywka, która dla danych wartości ekonomicznych przypisanych poszczególnym komórkom modelu blokowego dostarcza największego, niezdykontowanego strumienia gotówki z kopalni spośród wszystkich możliwych odkrywek, które spełniają zadane ograniczenia dotyczące nachylenia skarp.

**Odkrywka optymalna** (optimal pit) to taka sekwencja wydobywania bloków, która zapewnia najwyższą wartość bieżącą netto (NPV) odkrywki spośród wszystkich możliwych kolejności wydobywania zachowujących nachylenie skarp i inne nałożone ograniczenia, przy przyjętych parametrach techniczno-ekonomicznych (m.in. wydajności wydobywania i stopy dykontowania).

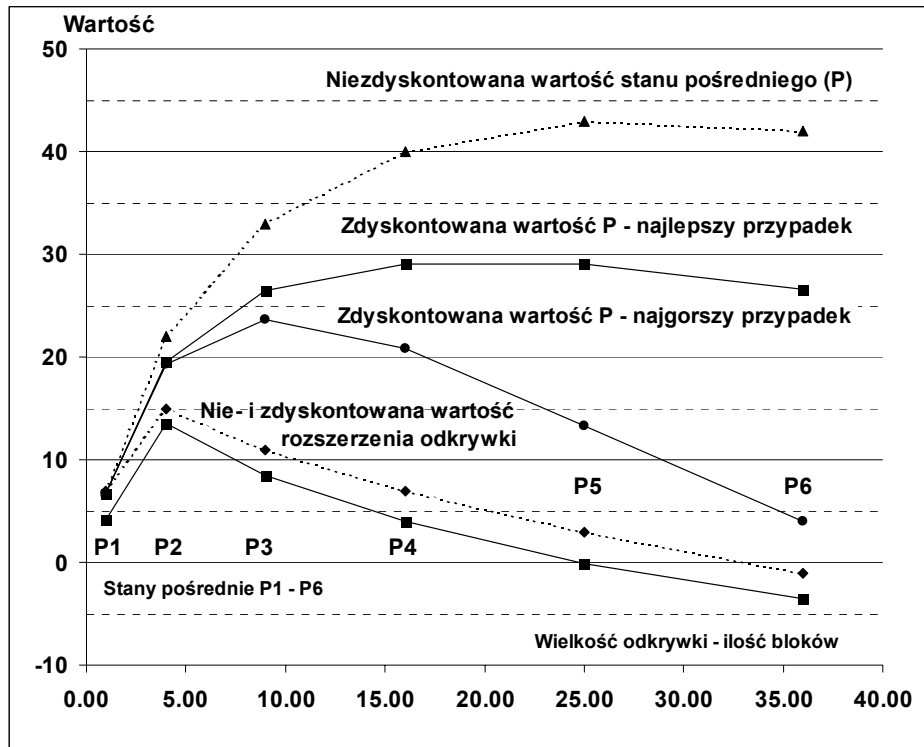
Tabela 1

<b>Stan pośredni odkrywki</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>	<b>P4</b>	<b>P5</b>	<b>P6</b>
<i>Czas eksploatacji w latach</i>	0.50	2.00	4.50	8.00	12.50	18.00
Wielkość odkrywki w blokach	1.00	4.00	9.00	16.00	25.00	36.00
Niezdykontowana wartość stanu pośredniego	7	22	33	40	<b>43</b>	42
Niezdykontowana wartość rozszerzenia odkrywki	7	15	11	7	<b>3</b>	-1
Zdykontowana wartość rozszerzenia odkrywki	4.09	13.48	8.51	<b>4.00</b>	-0.09	-3.47
Zdykontowana wartość stanu pośredniego najlepszy przypadek	6.67	19.51	26.51	<b>29.09</b>	29.05	26.59
Zdykontowana wartość stanu pośredniego najgorszy przypadek	6.67	19.24	<b>23.59</b>	20.77	13.30	3.98
<b>Przyjęte parametry:</b>						
Stopa dykontowania w skali roku w %	<b>10.00%</b>	Wydajność eksploatacji w blokach na rok			<b>2</b>	

Na podstawie danych z tabeli 1 i wykresów (rys.7) można wskazać, że odkrywka docelowa jest faza P5, gdyż dla niej wartość niezdykontowanych przepływów pieniężnych jest największa i wynosi 43. Odkrywka optymalną jest jednak P4. Dla niej bowiem wartość NPV sekwencji wydobywania jest największa i wynosi 29.09.

W pracy [21] zaproponowano praktyczną metodę podejmowania decyzji o dalszym rozwoju kopalni – przejściu z danego stanu pośredniego do następnego. Polega on na tym, że każdorazowo bada się wartość NPV rozszerzenia kopalni.

Artykuł został opublikowany w materiałach konferencyjnych  
VII Krajowego Zjazdu Górnictwa Odkrywkowego,  
który odbył się we Wrocławiu w 2000r.



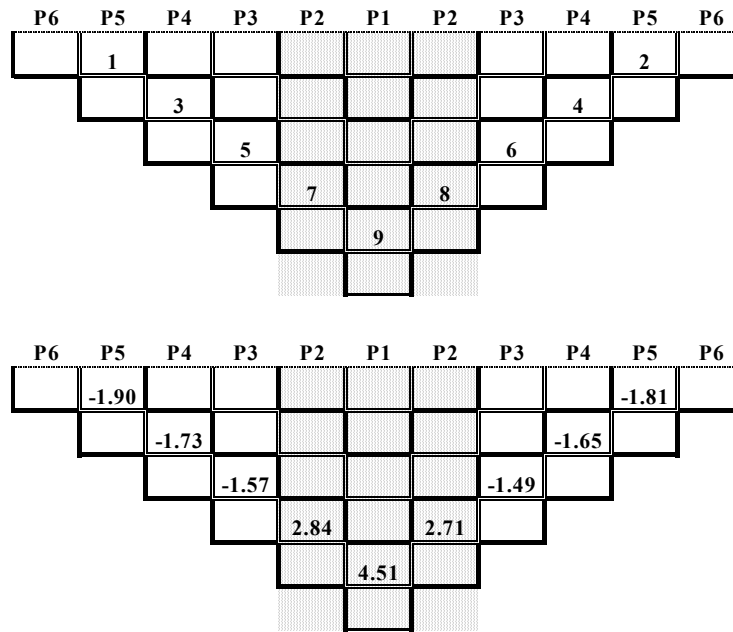
Rys. 7 Wartości stanów pośrednich w zależności od wielkości kopalni (tab.1)  
Fig. 7 Values of pushbacks as a function of the pit size (tab.1)

Na rys.8 pokazano kolejność wybierania bloków przy przejściu ze stanu P4 do P5 oraz wartości bloków przy rozszerzaniu odkrywki dla założeń dotyczących wydajności i stopy dyskontowania z tabeli 1.

Metoda ta dla tych samych założeń daje identyczne rezultaty co wcześniejsze analizy. W realnych warunkach decyzję o rozszerzeniu odkrywki podejmuje się kilka lat po sporządzeniu planów jej rozwoju i najczęściej większość z przyjętych kiedyś założeń jest już nieaktualna. Prawdopodobnie zmieniły się już ceny kopaliny i koszty, dlatego decyzja powinna być oparta na aktualnych danych. Metoda ta jest formą analizy krańcowej (marginalnej) znanej w ekonomii i stosowanej m.in. do wyznaczenia optymalnej wielkości produkcji zakładu (przychód krańcowy = kosztowi krańcowemu). Tutaj badamy, czy zwiększenie wielkości kopalni jest opłacalne tzn. czy NPV tej operacji jest dodatnie. W analizowanym przypadku tak nie jest  $NPV = -0.09$ . Realizując rozszerzenie zmniejszylibyśmy wartość kopalni. Dlatego stan P4 jest optymalny.

**Artykuł został opublikowany w materiałach konferencyjnych  
VII Krajowego Zjazdu Górnictwa Odkrywkowego,  
który odbył się we Wrocławiu w 2000r.**

Rzeczywista wartość NPV kopalni odkrywkowej znajduje się gdzieś pomiędzy górnym i dolnym oszacowaniem. Można ją dokładniej oszacować jedynie wtedy, gdy zaprojektowane zostaną praktyczne etapy pośrednie (pushbacks) jej rozwoju spełniające wszystkie wymogi sztuki górnictwa w tym m.in. zapewnienie miejsca na drogi transportowe z jednego stanu pośredniego do drugiego.



Rys. 8 Rozszerzenie odkrywki ze stanu P4 do P5.

Kolejność bloków (górze) i ich wartości po zdyskontowaniu wg założeń z tab.1 (dół).

Fig. 8 The advance of the pit from pushback 4 to 5

Sequence of blocks (upper) and their discounted values according to assumptions from tab.1 (lower)

Wygenerowane w programach optymalizacyjnych przez algorytm Lerchs'a-Grossmanna'a **fazy odkrywki** uzyskiwane dzięki procesowi parametryzacji, zazwyczaj nie nadają się do tego celu. **Proces parametryzacji** polega bowiem na znacznym obniżeniu wartości bloków w modelu ekonomicznym np. o 80% (co stanowi symulację zmian cen surowca) i wygenerowaniu nowej odkrywki docelowej dla zmienionych wartości. Odkrywka ta zazwyczaj jest znacznie mniejsza od docelowej i wskazuje dogodne miejsce na udostępnienie złoża (umiejscowiona jest w miejscu z którego najszybciej można dostać się do najwartościowszych partii złoża). W kolejnych krokach procesu zwiększa się o zadany procent wartość bloków generując całą serię (nawet do kilkudziesięciu) **zagnieżdżonych odkrywek** (faz). Ostatnia faza pokrywa się z pierwotną odkrywka docelową. Z uwagi na to, że jedynym kryterium tworzenia kolejnych faz jest maksymalizacja niezdykontowanych przepływów pieniężnych, często okazuje się poszczególny fazy rozmieszczone są

**Artykuł został opublikowany w materiałach konferencyjnych  
VII Krajowego Zjazdu Górnictwa Odkrywkowego,  
który odbył się we Wrocławiu w 2000r.**

bardzo nieregularnie. Czasami, nawet dla dużych różnic wartości bloków, fazy praktycznie nie różnią się od siebie wielkością, a kiedy indziej, nawet dla niewielkich różnic wartości bloków, różnica ich wielkości jest zbyt duża, by mogły one stanowić podstawę do projektowania praktycznych stanów pośrednich. Problem ten w literaturze znany jest pod nazwą „problemu przerwy” („gap problem”). Inną przeszkodą jest to, że fazy mogą składać się z wielu niepołączonych ze sobą odkrywek lub że brak jest pomiędzy nimi miejsca na zaprojektowanie dróg transportowych (miejsca dostępu).

Do tej pory jedynie program NPVScheduler skutecznie poradził sobie z tym problemem i oprócz faz generuje również **serię stanów pośrednich** - przestrzenie połączonych odkrywek o kontrolowanej wielkości (poprzez nałożenie minimalnych wymogów, które muszą one spełnić, np. ilość nadkładu i kopaliny użytecznej, skład jakościowy itp.) i zagwarantowaną, zadawaną przez użytkownika, przestrzenią dostępu. Dodatkowo zarówno kształt indywidualnej odkrywki jak i jej miejsce w szeregu może być kontrolowane poprzez nałożenie dodatkowych ograniczeń i modyfikacji w postaci granic wieloboków zdefiniowanych przy pomocy narzędzi rysunkowych dostępnych w tym programie.

#### 4. ALGORYTMY OPTYMALIZACJI

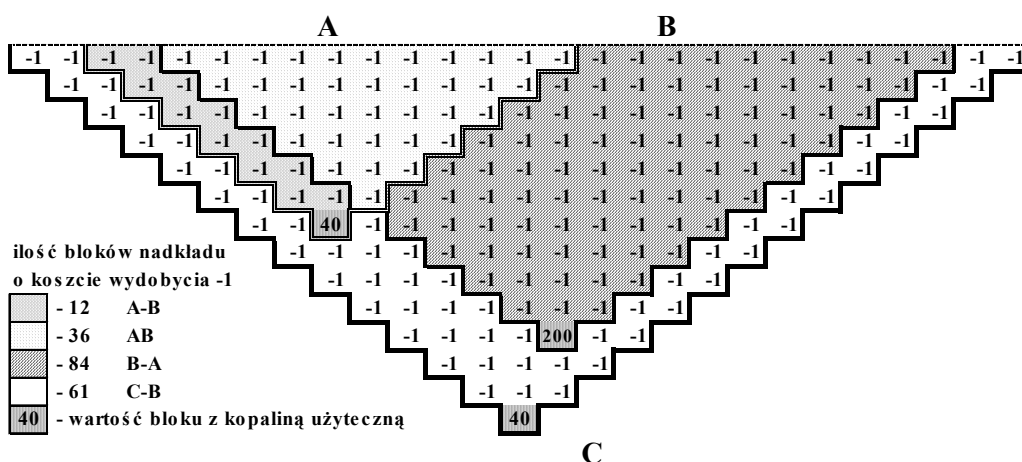
W górnictwie odkrywkowym od dawna podejmowane były próby znalezienia optymalnego ekonomicznie kształtu i wielkości docelowej odkrywki z zastosowaniem różnych algorytmów w tym m.in. zmiennych stożków (floating cone) i metody Lerchs'a-Grossmann'a oraz wielu innych metod służących do opracowania optymalnych planów długoterminowych.

**Metoda prób i błędów** polegałaby na obliczeniu wartości wszystkich podzbiorów modelu blokowego i wybraniu spośród tych, które spełniają warunek nachylenia skarp takiego, który ma największą wartość. Dla modelu blokowego liczącego 1000 bloków ( $10 \times 10 \times 10$ , co jest liczbą zdecydowanie za małą by prowadzić poważne projektowanie kopalni) liczba wszystkich podzbiorów wynosi  $2^{1000}$ . Przy uwzględnieniu odkrywek możliwych do wybrania np. spełniających nachylenie skarp 1:1 liczba alternatyw spada do  $10 \times 2^{99}$  [18], co również przekracza możliwości obliczeniowe komputera. Konieczne jest zatem korzystania z algorytmów inteligentniej i szybciej prowadzących do optymalnego rozwiązania.

**Metoda ruchomych stożków** (floating cone) [18] polega na wyszukiwaniu kopaliny użytecznej w złożu (przesuwając się z góry na dół) i analizowaniu wartości (różnicy przychodów i kosztów) odwróconych stożków z wierzchołkiem w bloku kopaliny użytecznej. Jeśli wartość stożka jest dodatnia to jest on usuwany z modelu (dołączany do docelowej odkrywki) i poszukiwania są kontynuowane.

**Artykuł został opublikowany w materiałach konferencyjnych  
VII Krajowego Zjazdu Górnictwa Odkrywkowego,  
który odbył się we Wrocławiu w 2000r.**

Metoda ta często prowadzi do nieoptymalnych rozwiązań. Sprawdzenie wszystkich możliwych kombinacji stożków prowadziłoby do analizy zbyt dużej liczby możliwości (por. metoda prób i błędów), a nie rozpoczynanie przeszukania od początku po usunięciu jakiegoś stożka (z uwagi na czas pracy komputera) prowadzi do błędów.



Rys. 9 Wartościowy model blokowy z trzema stożkami A, B, C.  
Fig. 9 The value block model with three cones A, B, C

Rozpatrzmy przykład podany w pracy [18] (Rys.9). W dwuwymiarowym modelu blokowym możemy wyróżnić 3 odwrócone stożki A, B i C liczące odpowiednio po 49, 121 i 196 bloków. W ich wierzchołkach znajdują się bloki kopaliny użytecznej o wartościach netto 40 (A), 200 (B) i 40 (C).

Algorytm ruchomych stożków, przesuwając się z góry na dół, zbadałby stożek A. Jego wartość wynosi  $-8$  ( $40 - 48$ ), nie nadaje się więc do eksploatacji. Kolejnym rozpatrywanym stożkiem byłby B. Jego wartość wynosi  $80$  ( $200 - 120$ ), a więc algorytm usunąłby go z modelu. Do rozpatrzenia pozostałby więc stożek C, a właściwie to co z niego pozostało, czyli C-B. Wartość tej pozostałości wynosi  $7$  ( $40 - 12 + 40 - 61$ ), a więc algorytm zdecydowałby o wybraniu również stożka C, co jest błędną decyzją.

Faktyczne wartości różnych kombinacji odkrywek znajdują się w tabeli 2. Podane są tam również wartości NPV odpowiadające najlepszej sekwencji wybierania dla następujących założeń:

Stopa dyskontowania w skali roku	10.00%
Stopa dyskontowania w skali 1 okresu (eksploatacji 1 bloku)	0.83%
Czas eksploatacji 1 bloku w mies.	1
Wydajność eksploatacji w blokach na rok	12

**Artykuł został opublikowany w materiałach konferencyjnych  
VII Krajowego Zjazdu Górnictwa Odkrywkowego,  
który odbył się we Wrocławiu w 2000r.**

Okazuje się, że odkrywką docelową jest suma stożków A i B, której wartość wynosi 108 (200 + 40 – 12 – 36 – 84). Dla przyjętych założeń kolejność wybierania: najpierw stożek A, a potem B jest również odkrywką optymalną (max NPV=12.87).

Tabela 2

<b>Stan pośredni odkrywki</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>AB</b>	<b>BA</b>	<b>ABC</b>	<b>BAC</b>
<i>Czas eksploatacji w latach</i>	4.08	10.08	11.17	11.17	16.33	16.33
Niedyskontowana wartość odkrywki	-8	80	<b>108</b>	<b>108</b>	87	87
Zdyskontowana wartość odkrywki	-12.79	-2.40	<b>12.87</b>	6.59	5.06	-1.23

**Metoda Lerchs'a-Grossmann'a** nazywana od nazwiska autorów podana została w 1965 roku w dwóch wariantach: dwuwymiarowym i trójwymiarowym.

Wersja dwuwymiarowa, operująca na przekrojach i przez to łatwa do oprogramowania nie znalazła jednak szerszego zastosowania. Metoda ta, wykorzystująca *programowanie dynamiczne*, pozwala na znalezienie optymalnego kształtu odkrywki docelowej dla danego przekroju. Nie gwarantuje jednak, że suma takich przekrojów tworząca przestrzenną powłokę da odkrywkę optymalną i spełni nałożone ograniczenia co do nachylenia skarp. Pojawiły się wprawdzie próby rozszerzenia tej metody na przypadek trójwymiarowy, jednak nie przyniosły zadowalających rezultatów. Dokładniejszy opis tej metody można znaleźć w [10]

Metoda druga, oparta na *teorii grafów*, znacznie bardziej skomplikowana do oprogramowania dla dużej ilości bloków i ograniczeń nałożonych na skarpy, gwarantowała znalezienie odkrywki o maksymalnej wartości niezależnie od przyjętego układu skarp [27, 28]. Identyczne rozwiązania daje również algorytm Johnson'a (1968) oparty na *przepływach sieciowych*. Wykazano, że jest on matematycznie tożsamy z rozwiązaniem metodą teorii grafów. Obie metody stanowią alternatywną technikę rozwiązania tego samego problemu *programowania liniowego* polegającego na maksymalizacji wartości sumy bloków należących do odkrywki docelowej przy ograniczeniach wynikających z kolejności eksploatacji bloków zdeterminowanej ich położeniem i nachyleniem skarp. Złożony i czasochłonny poszukiwanie rozwiązań metodami programowania liniowego można zastąpić wygodniejszymi i szybszymi algorytmami z teorii grafów i przepływów sieciowych. Jeszcze nie tak dawno, bo parę lat temu, nawet te szybkie algorytmy pozwalały znaleźć rozwiązania po wielogodzinnych, a czasem nawet po wielotygodniowych obliczeniach [12]. Dlatego niektórzy autorzy poszukiwali możliwości skrócenia czasu poszukiwań optymalnego rozwiązania w algorytmie Lerchs'a – Grossmann'a [10]. Obecnie wzrost mocy i szybkości przetwarzania procesorów skrócił ten czas do kilku minut.

**Artykuł został opublikowany w materiałach konferencyjnych  
VII Krajowego Zjazdu Górnictwa Odkrywkowego,  
który odbył się we Wrocławiu w 2000r.**

Spośród omawianych tu algorytmów powszechne i komercyjne zastosowanie znalazła trójwymiarowa metoda Lerchs'a-Grossmann'a dostępna w postaci programu Whittle Three D na stacjach roboczych i komputerach PC od połowy lat osiemdziesiątych. Dzięki temu algorytmowi i programowi od tamtej pory powszechną praktyką przy sporządzaniu projektów nowych kopalń odkrywkowych i analizie rozwoju już istniejących stała się optymalizacja ekonomiczna.

Program Whittle 3D umożliwia "stacynną" analizę prowadzącą do wskazania optymalnej odkrywki docelowej (mającej najwyższy wskaźnik NPV) dla określonego zestawu parametrów wejściowych obejmujących m.in. cenę kopaliny, koszty wydobycia i przeróbki oraz ograniczenia techniczne w postaci dopuszczalnego kąta nachylenia skarp. Kolejny produkt Whittle 4D, miał jeszcze większe możliwości, gdyż pozwalał na "dynamiczną" analizę wpływu przyszłej ceny surowca na zmianę kształtu i wielkości docelowej odkrywki czyli tzw. proces parametryzacji. W wyniku tej analizy uzyskuje się zbiór zagnieżdżonych odkrywek (nawet do kilkudziesięciu!), z których każda jest optymalna (!) dla danego poziomu cen. Najmniejsza z nich odpowiada najniższym cenom surowca, a największa najwyższym. Układ tych „zagnieżdżonych” odkrywek stanowi podstawę opracowania optymalnego planu eksploatacji (od najmniejszej aż do tej z pośród odkrywek, która odpowiada rzeczywistemu poziomowi cen). Dla każdej z odkrywek (planów eksploatacji) można wyznaczyć wskaźnik NPV, co pozwala wybrać najlepszą (o największym NPV). Od momentu pojawienia się programu Whittle 4D zaczęto szeroko wykorzystywać analizę wrażliwości do badania wpływu niewielkich zmian cen surowców, kosztów, kątów nachylenia skarp itp. na opłacalność przedsięwzięć górniczych. Oba omówione tu pokrótce programy mogą być zintegrowane z systemem DATAMINE stanowiąc dodatkowe moduły rozszerzające jego możliwości.

Do niedawna programy firmy Whittle były właściwie jedynymi programami specjalizującymi się w ekonomicznej optymalizacji kopalń odkrywkowych. Sytuacja na tym rynku zmieniła się z chwilą pojawienia się w 1998 r. programów MaxiPit i NPVScheduler firmy Earthworks Corp. (należącej do grupy DATAMINE): [5]. Pierwszy program może zastąpić oba programy Whittle 3D i 4D razem wzięte. Oferuje bowiem ten sam algorytm optymalizacyjny (nieco zmodyfikowany) wbudowany w wygodniejsze środowisko pracy (pełne środowisko Windows), z lepszymi interakcyjnymi i graficznymi narzędziami do edycji kątów nachyleń skarp i zadawania ograniczeń na rozwój eksploatacji oraz znacznie ciekawszymi możliwościami graficznymi do sporządzania map, przekrojów i wykresów [7]. Z kolei NPVScheduler to znacznie rozbudowana wersja pierwszego programu pozwalająca na optymalizację długoterminowego rozwoju odkrywek. Ich porównanie z programami Whittle 3D i 4D można znaleźć w pracy [1, 8, 15] oraz na stronie internetowej: [www.earthworks.com.au](http://www.earthworks.com.au).

**Artykuł został opublikowany w materiałach konferencyjnych  
VII Krajowego Zjazdu Górnictwa Odkrywkowego,  
który odbył się we Wrocławiu w 2000r.**

## 5. OPTYMALNA ODKRYWKA DOCELOWA I CO DALEJ ?

Wygenerowanie odkrywki docelowej, faz, stanów pośrednich czy odkrywki optymalnej, choć dla wielu programów stanowi kres ich możliwości (np. Whittle 3D, 4D, czy 4X lub MaxiPit), dla użytkownika stanowi dopiero etap wstępny przygotowania szczegółowego harmonogramu wydobywania i dokładnych projektów jej rozwoju. Dla wielu użytkowników maksymalizacja wartości NPV nie jest jedynym celem optymalizacji [17]. Dla cementowni, odkrywek rud żelaza, czy producentów węgla [12, 13, 22, 23], oprócz NPV liczy się również zapewnienie stabilnej jakości eksploatowanego surowca na przestrzeni całego życia kopalni i maksymalizacja wykorzystania posiadanych zasobów. Nie zawsze można bowiem tak powiązać jakość surowca z ceną kopaliny, by maksymalizacja NPV pociągała za sobą odpowiednie mieszanie urobku o różnej jakości z różnych frontów, odkrywek, czy składów, by uzyskać uśredniony urobek o pożądanych parametrach. Problem ten próbowano rozwiązać sprytnie wykorzystując standardowe programy do optymalizacji odkrywek [24], jednak rozwiązania takie są dosyć skomplikowane i mało intuicyjne.

Pojawienie się programu NPVScheduler rozwiązało ten problem. Program ten pozwala bowiem oprócz maksymalizacji NPV wprowadzić wiele zmiennych celowych określających wymagania jakościowe (wartość pożądaną i dopuszczalne granice zmienności) i opracować optymalną sekwencję wydobywania spełniającą nałożone ograniczenia, przy jednoczesnej maksymalizacji NPV. Oznacza to, że spośród wszystkich harmonogramów wydobywania spełniających nałożone ograniczenia wybierany jest ten, który ma największą wartość NPV. Optymalizacja może dotyczyć każdej ze zmiennych celowych z osobna lub dowolnych ich zestawów. Jeśli program nie może znaleźć optymalnego harmonogramu to kolejne ograniczenia są uwalniane tak długo, aż się go uzyska. Użytkownik informowany jest o wszelkich odchyleniach od założonych wymagań. Program ten może być wykorzystany na każdym etapie rozwoju kopalni od wstępnych analiz (prefeasibility study) po rekonstrukcję i weryfikację planów rozwoju kopalń istniejących m.in. z uwagi na zmianę struktury cen i kosztów, odkrycie nowych zasobów i pojawienie się nowych danych geologicznych lub do celów negocjacji cen pomiędzy kopalnią, a odbiorcą przy zawieraniu długoterminowych kontraktów na dostawę surowca [12].

Algorytm tworzenia harmonogramu jest oparty na programowaniu dynamicznym - ogólnej metodzie optymalizacji względem czasu. Do tworzenia harmonogramów metoda ta jest lepsza niż programowanie liniowe ponieważ wykorzystuje struktury zależne od czasu oraz dynamikę problemu. W wyniku czego może być użyta do rozwiązywania znacznie większych i bardziej skomplikowanych problemów. Algorytm opracował matematyk polskiego pochodzenia pracujący w USA [26]

Program NPVScheduler wraz z innymi procesami systemu DATAMINE do planowania wydobywania i rozwoju kopalni:

- Tworzenie Harmonogramów Wydobywania (Production Scheduling),

**Artykuł został opublikowany w materiałach konferencyjnych  
VII Krajowego Zjazdu Górnictwa Odkrywkowego,  
który odbył się we Wrocławiu w 2000r.**

- Interakcyjne Ustalanie Sekwencji Wydobywania (Interactive Production Sequencer),
- Postęp Frontu Wydobywczego (Face Advance Module) i
- Moduł do tworzenia optymalnych planów krótko- i średnioterminowych z uwzględnieniem mieszania urobku z różnych frontów wydobywczych i składów ACHIEVE wykorzystujący metody programowania liniowego [13]

tworzy kompletny zestaw narzędzi do tworzenia harmonogramów wydobywania dla dowolnego horyzontu planowania. Dopiero bowiem wspólne wykorzystanie narzędzi do sporządzania planów o różnym horyzoncie czasowym może zapewnić, że cele kopalni zostaną osiągnięte, a wykorzystanie posiadanych zasobów będzie maksymalne.

Wprowadzana dużym kosztem i nakładem pracy optymalizacja krótkoterminowa wykorzystująca analizatory składu urobku i zapewniająca możliwość sterowania bieżącą jakością eksploatowanej kopaliny (np. w cementowniach) musi być skoordynowana ze średnio- i długoterminowymi planami rozwoju kopalni, gdyż w przeciwnym razie może doprowadzić do nieoptymalnego jej rozwoju np. poprzez wyczerpanie pewnych zasobów lub nie wykorzystanie uboższych partii złoża. Krótkoterminowa optymalizacja rzadko kiedy prowadzi bowiem do rozwiązań optymalnych w dłuższym horyzoncie czasowym i z pewnością nie maksymalizuje wykorzystania zasobów geologicznych.

Zaletą programu NPVScheduler jest jego unikalność, gdyż na rynku nie ma obecnie systemu o podobnych możliwościach skoncentrowanych w jednym programie i wspólnym, wygodnym środowisku oraz jego otwartość. Jest on bowiem w pełni samodzielnym programem i może być zintegrowany nie tylko z systemem DATAMINE, lecz praktycznie z każdym innym programem geologiczno-górnictwem lub nawet systemami CAD (o ile są one w stanie stworzyć przestrzenny, jakościowy model blokowy złoża, który jest podstawą planowania). Jest to możliwe dzięki nowoczesnemu i elastycznemu modułowi wymiany danych DSD pozwalającemu na łatwą wymianę danych z różnymi z różnymi zbiorów w formatach: tekstowych, CAD (DXF, OpenDWG, AutoCAD 2000), GIS (ESRI ArcView), ODBC/SQL, DataShed, arkuszy kalkulacyjnych i wielu programów geologiczno-górnictwem (m.in. Datamine, Gemcom, GDM, Medsystem, Micromine, Surpac, Vulcan, Wescom).

Ostatnio na rynku pojawiła się druga, znacznie rozbudowana, wersja programu NPVScheduler 2. W zakresie optymalizacji planów długoterminowych nowe funkcje programu obejmują możliwość:

- wykorzystania przy sporządzaniu harmonogramów wydobywania tak wielu składowisk jak jest to potrzebne, każde z własnym zestawem parametrów: zdefiniowanymi rodzajami kopaliny i okruszczowaniami granicznymi, objętością, intensywnością odzysku i kosztami ponownego podawania.
- zmiany ceny produktów, kosztów eksploatacji, kosztów przeróbki, stóp dyskontowania i ograniczeń wydobywania wraz z upływem czasu.

**Artykuł został opublikowany w materiałach konferencyjnych  
VII Krajowego Zjazdu Górnictwa Odkrywkowego,  
który odbył się we Wrocławiu w 2000r.**

- jednoczesnego radzenia sobie z wieloma rodzajami kopaliny, wieloma okruszczowaniami i wieloma metodami przeróbki.

Dodatkowy moduł MineFlow Optimiser umożliwia przeprowadzenie równoczesnej optymalizacji zarówno okruszcowania granicznego (wartości brzeżnej) jak i wydajności wydobywania wraz z wszystkim wcześniej wymienionymi możliwościami.

Wcześniej wymienione możliwości i dodatkowe funkcje sprawiają, że program NPVScheduler jest obecnie najbardziej zaawansowanym systemem tego typu na rynku.

#### LITERATURA

- [1] AUSTRALIAN MINING CONSULTANTS PTY LTD, *Earthworks Corporation Evaluation of MaxiPit Pit Optimisation Software*, raport AMC 297045A, 26 February 1998.
- [2] BHAPPU R.R., GUZMAN J., *Mineral Investment Decision Making*, E&Mj - July 1995
- [3] *Calculating Costs for use with Whittle Four-D*, Mining Magazine – August 1994.
- [4] CHARBONNEAU D.J., *Application of the Whittle 4D Pit Optimizing Program for Mineral Resource Evaluation*, Computer Applications in The Mineral Industry, Vancouver BC, Canada, September 1991.
- [5] *DATAMINE Newsletter*, March 1998.
- [6] DOWD P.A., XU C., *Financial Evaluations of Mining Projects*, materiały szkoleniowe.
- [7] EARTHWORKS CORPORATION PTY LTD, *A Guide to Earthworks NPV Scheduler*, materiały szkoleniowe.
- [8] FERREIRA F., M., *Report on the Comparison between MaxiPit and W4D at N4E Mine Carajas*, Sistema Norte, CVRD.
- [9] GENTRY D.W., O'NEIL T.J., *Mine Investment Analysis*, SME AIME New York 1984
- [10] HARTMAN H.L. (senior editor). *SME Mining Engineering Handbook*, vol.1, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. Littleton, Colorado 1992.
- [11] HUSTRULID W., KUCHTA M. *Open Pit Mine Planning & Design*, Balkema, Rotterdam 1995
- [12] JURDZIAK L., KAWALEC W., *Optymalizacja rozwoju odkrywki w oparciu o cenę kopaliny i wymagania jakościowe na przykładzie złoża „SZCZERCÓW”*. VII Konferencja „Wykorzystanie złóż kopaliny użytecznych”, PAN IGSMiE i AGH. Zakopane 2000.
- [13] JURDZIAK L., KAWALEC W., *Wykorzystanie lokalnie aktualizowanego modelu przestrzennego złoża dla szczegółowego sterowania jakością węgla brunatnego*. VII Konferencja „Wykorzystanie złóż kopaliny użytecznych”, PAN IGSMiE i AGH. Zakopane 2000.
- [14] JURDZIAK L., *Możliwości podniesienia jakości danych niezbędnych do prowadzenia oceny ekonomicznej przedsięwzięć inwestycyjnych w górnictwie*, Konferencja: „Ekonomika, organizacja, zarządzanie i marketing w górnictwie”, Kraków 1995.
- [15] JURDZIAK L., *Wartość bieżąca netto w projektowaniu kopalni odkrywkowych – możliwości programu MaxiPit i NPV Scheduler*, Konferencja: Ekonomika, Organizacja i Zarządzanie w Górnictwie '99”, Ustroń-Jaszowiec 1999.
- [16] JURDZIAK L., *Zasady tworzenia przestrzennych modeli rozkładu wartości złoża i kosztów eksploatacji na potrzeby programów optymalizacyjnych*. VII Krajowy Zjazd Górnictwa Odkrywkowego, Wrocław 2000
- [17] KAPUTIN YU.E., *NPV Scheduler in pit optimisation*. Konferencja 1998.
- [18] KENNEDY B.A (Editor), *Surface Mining*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. Littleton, Colorado 1990.
- [19] LIIMATAINEN J., *Economic optimization models for capacity and cut off determination*. 5<sup>th</sup> International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection '96, Sao Paulo Brazil 1996.

**Artykuł został opublikowany w materiałach konferencyjnych  
VII Krajowego Zjazdu Górnictwa Odkrywkowego,  
który odbył się we Wrocławiu w 2000r.**

- [20] LIIMATAINEN J., *The evaluation of a mining project*. European Mining Course. Mining Technology and Economics. Helsinki University of Technology.
- [21] NILSSON D., *Optimal final pit depth: Once Again*, Mining Engineering - January 1997.
- [22] SPECYLAK J., BOROWICZ A., ŚLUSARCZYK G., KAWALEC W., *Wstępna ocena złoża węgla brunatnego Belchatów – pole Szczerców przy użyciu techniki komputerowej*, Górnictwo Odkrywkowe nr 3, Wrocław 1996
- [23] SPECYLAK J., KAWALEC W., *Projektowanie struktury wyrobiska eksploatacyjnego na cyfrowym modelu złoża węgla brunatnego*, Materiały konferencyjne, „Optymalizacja wydobywania kopalin przy wykorzystaniu technik informatycznych”, Turów 1999.
- [24] SRINIVASAN S., *Combined Pit and Blend Optimisation*, SME Annual Meeting, Phoenix, Arizona - March 11-14, 1996.
- [25] STERMOLE F.J., STERMOLE J.M., *Economic Evaluation and Investment Decision Methods*, Investment Evaluations Corporation, Golden Colorado 1987.
- [26] TOLWINSKI B., GOLOSINSKI T.S., *Long term open pit scheduler*, Mine Planning and Equipment Selection 1995, Balkema – Rotterdam 1995
- [27] WHITTLE J., *Four-X Strategic Planning Software for Open Pit Mines*. Reference Manual Whittle Programming Pty Ltd 1998.
- [28] WHITTLE J., *The Facts and Fallacies of Open Pit Optimization*. Materiały firmy Whittle Programming Pty Ltd

WHAT IS IT AN ECONOMIC OPTIMISATION OF OPEN PIT MINES?

Open pit optimisation programs have been widely used in the world since about 15 years. So not much longer than market economy rules are present in Poland. Despite this they have not become very popular here. One of the reasons of reluctance in application of computers in this area is a lack of knowledge. This paper tries to fulfil this gap. At the beginning the rules of economic evaluation of projects profitability has been discussed together with discounted cash flow methods (DCF). Using simple examples several terms used in optimisation programs (from Whittle Programming and Earthworks Corp. firms) has been introduced. Among others: an ultimate pit, nested pits (phases), a sequence of extraction, an optimal pit, and pushbacks. It has been also shown how the value of a pit is changing as a consequence of the change in sequence of extraction. A short description of Lerchs-Grossmann algorithm as well as floating cone method has also been described and differences underlined. Capabilities of optimisations programs available on the market such as Whittle 3D and 4D as well as MaxiPit have been discussed together with further possibility of optimisation of long term pit schedules in programs: NPVScheduler 2 and Mine Flow.