

*Maciej Zajączkowski\**

## WPŁYW KSZTAŁTU ZWAŁOWISKA ZEWNĘTRZNEGO NA KOSZTY TRANSPORTU ZWAŁOWANEGO UROBKU\*\*

---

### 1. Wstęp

Budowa zwałowiska zewnętrznego jest nierozłącznym elementem odkrywkowych prac udostępniających dane złoża. Jego lokalizacja oraz kształt zależą od wielu czynników i są bezpośrednio związane z przyjętą technologią eksploatacji. W przypadku eksploatacji węgla brunatnego zwałowiska zewnętrzne charakteryzują się znacznymi rozmiarami. Wynika to z objętości wkopu udostępniającego oraz ilości nadkładu koniecznego do zdjęcia do czasu całkowitego przejścia na zwałowanie wewnętrzne. Dlatego też ważne jest aby jego kształt zapewniał możliwie najkrótsze drogi transportu zwałowanego urobku. Żeby to osiągnąć należy określić przestrzenne położenie środka ciężkości bryły zwałowiska i jego odległości od początku pochylni transportowej na tym zwałowisku.

Zwałowiska zewnętrzne w górnictwie węgla brunatnego z uwagi na zastosowanie przenośników taśmowych charakteryzują się z reguły prostolinijnymi frontami zwałowymi. Zmiana tego kształtu możliwa jest podczas wachlarzowego postępu lub poprzez okresowe wydłużanie bądź skracanie przenośników przesuwnych. W każdym z tych przypadków powoduje to utrudnienia technologiczno-ruchowe podczas procesu zwałowania [4].

### 2. Wyznaczenie środka ciężkości zwałowiska zewnętrznego

Wyznaczanie współrzędnych środka ciężkości brył traktowane jest jako zagadnienie trójwymiarowe. Dla jego określenia konieczne jest założenie, że zwałowisko zewnętrzne to bryła jednorodna, a więc masa rozmieszczona jest równomiernie w całej jego objętości. W takim przypadku położenie środka ciężkości zwałowiska będzie zależało tylko od jego kształtu geometrycznego. Takie podejście umożliwi określenie średniej drogi transportu zwałowanego urobku licząc od początku pochylni transportowej na zwałowisku.

---

\* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

\*\* Artykuł finansowany z badań własnych AGH nr 10.10.100.382

Współrzędne przestrzenne środka ciężkości bryły jednorodnej określa się za pomocą wzoru (1):

$$x_c = \frac{\int x dV}{V}, \quad y_c = \frac{\int y dV}{V}, \quad z_c = \frac{\int z dV}{V} \quad (1)$$

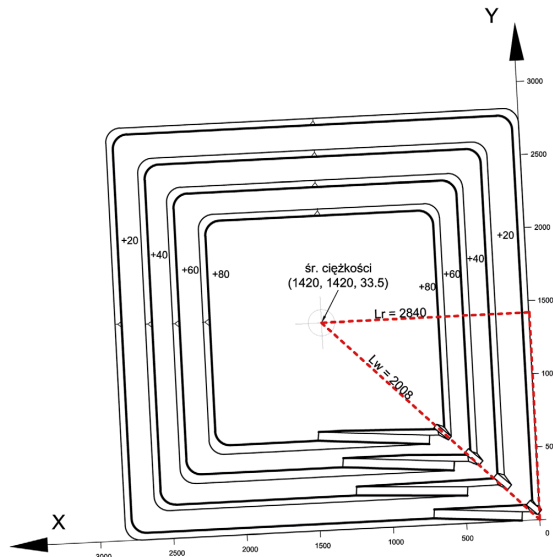
gdzie:

- $V$  — całkowita objętość danej bryły,  $m^3$ ,
- $x_c$  — prostopadła odległość w kierunku  $x$  od środka ciężkości do płaszczyzny  $YZ$ ,
- $y_c$  — prostopadła odległość w kierunku  $y$  od środka ciężkości do płaszczyzny  $ZX$ ,
- $z_c$  — prostopadła odległość w kierunku  $z$  od środka ciężkości do płaszczyzny  $XY$ .

Ważnym elementem jest określenie właściwego położenia początku układu współrzędnych. Aby prawidłowo wyznaczyć odległość transportu urobku na zwałowisku konieczne jest przyjęcie takiego układu współrzędnych aby bryła zwałowiska w możliwie jak największej części znajdowała się w jednej jego ćwiartce.

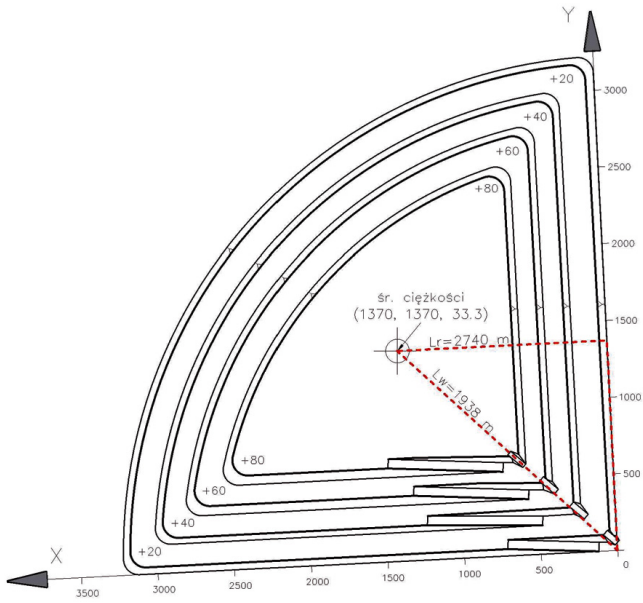
Dla określenia zmienności położenia środka ciężkości w zależności od kształtu zwałowiska zewnętrznego zaprojektowano trzy bryły o tej samej objętości oraz generalnym nachyleniu zboczy. Każde z nich charakteryzuje się objętością  $425 \text{ mln } m^3$ , kątem generalnego nachylenia zboczy  $8^\circ$  oraz kątem nachylenia skarp zwałowych równym  $25^\circ$ . Wszystkie składają się z 4 pięter po 20 m. Różnią się jednak kształtem podstawy:

- zwałowisko 1 o podstawie kwadratu (rys. 1),



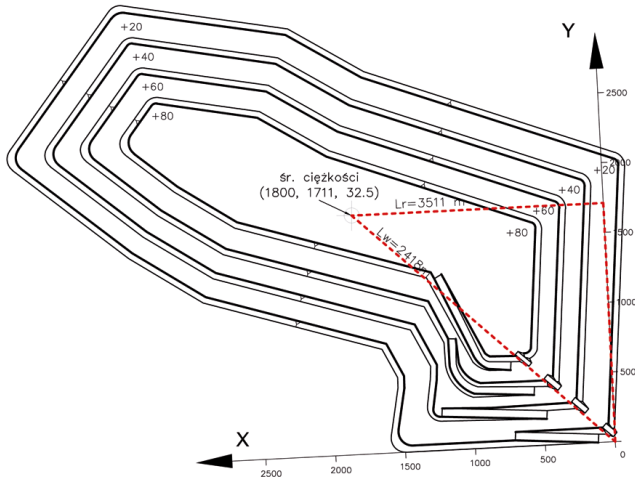
Rys. 1. Zwałowisko zewnętrzne 1 o podstawie kwadratu

— zwałowisko 2 o podstawie wycinka koła (rys. 2),



Rys. 2. Zwałowisko zewnętrzne 2 o podstawie wycinka koła

— zwałowisko 3 o podstawie nieregularnej (rys. 3).



Rys. 3. Zwałowisko zewnętrzne 3 o podstawie nieregularnej

### 3. Analiza parametrów geometrycznych zwałowisk zewnętrznych

Każde z przedstawionych zwałowisk charakteryzuje się innym rozmieszczeniem objętości na poszczególnych piętrach. Pojemność każdego piętra przedstawiono w tabeli 1.

Obliczeń dokonano w programie Surpac 6.1.4 poprzez wygenerowanie modelu zwałowiska wraz z modelami każdego piętra oraz zaraportowanie objętości wewnątrz każdego z pięter.

TABELA 1

**Objętości poszczególnych pięter w zależności od kształtu zwałowiska zewnętrznego**

Piętro zwałowiska		Zwałowisko 1		Zwałowisko 2		Zwałowisko 3	
		objętość, mln m <sup>3</sup>	%	objętość, mln m <sup>3</sup>	%	objętość, mln m <sup>3</sup>	%
I	0 / +20	155,1	36,5	156,4	36,8	162,4	38,2
II	+20 / +40	119,4	28,1	119,9	28,2	122,0	28,7
III	+40 / +60	88,4	20,8	88,0	20,7	86,3	20,3
IV	+60 / +80	62,1	14,6	60,8	14,3	54,4	12,8
Razem:		425,0	100,0	425,0	100,0	425,0	100,0

Pojemność pięter jest zmienna i maleje wraz z wysokością zwałowiska. Jest to oczywiście związane z przyjętym generalnym nachyleniem zboczy. Na pierwszym piętrze znajduje się od 36,5 do 38,2% całkowitej objętości natomiast na czwartym piętrze już tylko 12,8–14,6%. Największą objętość na najwyższym piętrze można ulokować na zwałowisku 1. Natomiast im bardziej zróżnicowany kształt podstawy, tym więcej objętości znajduje się na pierwszym piętrze. Przez to zwiększa się pole powierzchni zajętej pod zwałowisko.

Dlatego też, chcąc zlokalizować zwałowisko na jak najmniejszej powierzchni powinno dążyć się do kwadratowej podstawy. Natomiast im bardziej zróżnicowany jej kształt zwałowisko będzie wymagało zajęcia większej powierzchni terenu. W tym przypadku zwałowisko 1 zajmie 806,68 ha natomiast zwałowisko 3 już o 43,45 ha więcej.

Parametry geometryczne poszczególnych zwałowisk przedstawiono w tabeli 2.

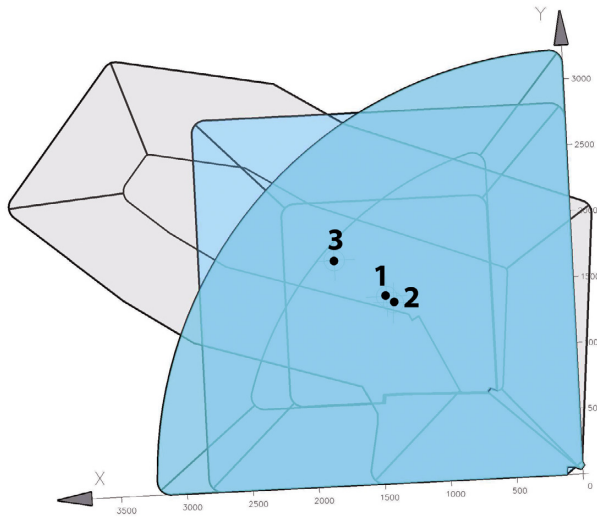
Każde z analizowanych zwałowisk posiada taką samą objętość. Jednak w zależności od kształtu podstawy zmienia się nie tylko powierzchnia konieczna do zajęcia pod jego budowę, ale także przestrzenne rozmieszczenie środków ciężkości. Ich odległość od początku pochylni transportowej na zwałowisku określa średnią drogę transportu urobku. Z uwagi na różne kierunki postępu frontów zwałowych można określić te odległości dla postępu wachlarzowego według metryki euklidesowej a dla postępu równoległego według metryki taksonkowej [2].

TABELA 2

## Parametry geometryczne poszczególnych zwałowisk zewnętrznych

Wyszczególnienie	Zwałowisko 1	Zwałowisko 2	Zwałowisko 3
Pojemność, m <sup>3</sup>	425,0	425,0	425,0
Pole podstawy, ha	806,68	814,28	850,13
Współrzędne środka ciężkości:			
$x_c$	1 420	1 370	1 800
$y_c$	1 420	1 370	1 711
$z_c$	33,5	33,3	32,5
Odległość środka ciężkości od pochylni transportowej w postępie wachlarzowym, m	2 008	1 938	2 418
Odległość środka ciężkości od pochylni transportowej w postępie równoległym, m	2 840	2 740	3 511

Rozmieszczenia środków ciężkości dla każdego z trzech zwałowisk przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Porównanie kształtów zwałowisk zewnętrznych wraz z położeniem ich środka ciężkości

W zależności od przyjętego kierunku postępu w każdym z przypadków odległości te są różne. Najkrótsza droga transportu występuje w przypadku budowy zwałowiska 2 i wy-

nosi 1938 m dla postępu wachlarzowego. Dla zwałowiska 1 jest ona o 70 m dłuższa, a dla zwałowiska 3 już o 480 m (co stanowi wzrost o ok. 25%).

Podobna sytuacja występuje gdy odległości transportu mierzona jest metryką taksówkową. Tu również najkrótszą drogą cechuje się zwałowisko 2, która wynosi 2740 m. W przypadku zwałowiska 1 jest ona o 100 m dłuższa, a dla zwałowiska 3 już o 771 m (co stanowi wzrost o ok. 28%).

Należy także zwrócić uwagę na średnią wysokość podnoszenia urobku. Dla zwałowiska 1 jest ona o 0,2 m większa niż dla zwałowiska 2 i o 1 m od zwałowiska 3. Wynika to z faktu, że w przypadku bryły o podstawie kwadratu większą objętość można ulokować na wyższych piętrach.

#### 4. Analiza drogi transportu urobku na zwałowisku zewnętrznym

Mając określoną odległość transportu urobku od początku pochylni transportowej do położenia środka ciężkości bryły zwałowiska można wyznaczyć zarówno jednostkowe zużycie energii potrzebnej do przetransportowania danej objętości na zadaną odległość w poziomie jak i energii potrzebnej do podniesienia urobku. Jednostkowe zużycie energii wyrażone w  $[\text{Wh}/\text{m}^3 \cdot \text{m}]$  można określić na podstawie wyników oporu ruchu i mocy napędu przenośników pracujących na zwałowisku zewnętrznym [3].

Przykładowe obliczenie jednostkowego zużycia energii przedstawiono w tabeli 3. Założono typowy przenośnik nadkładowy B2000, prędkość taśmy 5,36 m/s, taśma St3150 przegubowe zestawy kraźnikowe o rozstawie 1,2 m (górne) oraz 3,6 m (dolne), napęd czołowy dwubębnowy, temperatura otoczenia 5°C, przeciętne warunki eksploatacji (m.in. średnie zbieganie taśmy i strugi urobku).

TABELA 3  
Wskaźniki jednostkowego zużycia energii w transporcie taśmowym

Wskaźnik jednostkowego zużycia energii	Jednostka	Nadkład
w transporcie poziomym	$\text{Wh}/\text{m}^3 \cdot \text{m}$	0,156
dla podnoszenie urobku	$\text{Wh}/\text{m}^3 \cdot \text{m}$	3,432

Analizując zarówno jednostkowe zużycie energii w transporcie poziomym, jak i zużycie energii dla podnoszenia urobku można zauważyć, że aby podnieść urobek na 1 m należy dostarczyć ok. 22 razy więcej energii niż w przypadku transportu tego urobku na odległość 1 m w poziomie.

Uwzględniając przestrzenne umiejscowienie środka ciężkości zwałowiska można wyznaczyć jednostkowe zużycie energii transportu potrzebnej do przemieszczenia danej objętości urobku na zwałowisku zewnętrznym. Zestawiono je w tabeli 4.

TABELI 4

**Jednostkowe zużycie energii transportu w zależności od kształtu zwałowiska**

Wyszczególnienie	Jednostka	Zwałowisko 1	Zwałowisko 2	Zwałowisko 3
postęp wachlarzowy				
Jednostkowe zużycie energii transportu poziomego do środka ciężkości w postępie wachlarzowym	kWh/m <sup>3</sup>	0,314	0,303	0,378
Jednostkowe zużycie energii dla podniesienia urobku do środka ciężkości w postępie wachlarzowym	kWh/m <sup>3</sup>	0,114	0,114	0,111
Jednostkowe zużycie energii transportu w postępie wachlarzowym	kWh/m <sup>3</sup>	0,428	0,417	0,489
	%	100	97	114
postęp równoległy				
Jednostkowe zużycie energii transportu poziomego do środka ciężkości w postępie równoległym	kWh/m <sup>3</sup>	0,444	0,428	0,548
Jednostkowe zużycie energii dla podniesienia urobku do środka ciężkości w postępie równoległym	kWh/m <sup>3</sup>	0,114	0,114	0,111
Jednostkowe zużycie energii transportu w postępie równoległym	kWh/m <sup>3</sup>	0,558	0,542	0,659
	%	100	97	118

Średnie zużycie energii transportu urobku na zwałowisku 1 w postępie wachlarzowym wyniesie 0,428 kWh/m<sup>3</sup>, na zwałowisku 2 będzie to o 3% mniej (0,417 kWh/m<sup>3</sup>). Największym jednostkowym zużyciem energii charakteryzuje się zwałowisko 3, a więc o nieregularnym kształcie podstawy. Jest ono o 14% większe niż w przypadku zwałowiska o podstawie kwadratu.

Postęp równoległy charakteryzuje się dłuższymi drogami transportowymi od postępu wachlarzowego. Ma to także odzwierciedlenie w jednostkowym zużyciu energii. W tym przypadku jest ono najmniejsze dla zwałowiska o podstawie wycinka koła i wynosi 0,542 kWh/m<sup>3</sup> co stanowi 97% jednostkowego zużycia energii dla zwałowiska 1. Podobnie jak w przypadku postępu wachlarzowego największym jednostkowym zużyciem energii charakteryzuje się zwałowisko 3 i jest ono większe o 18% od zwałowiska o kształcie kwadratu.

Jednostkowe zużycie energii transportu ma bezpośrednie przełożenie na koszty transportu urobku na zwałowisku zewnętrznym [1]. Można je wyznaczyć wg wzoru (2):

$$KOP = V \cdot JE_t \cdot C_F \cdot u_E \text{ [zł]} \quad (2)$$

gdzie:

$KOP$  — koszt transportu urobku na zwałowisku zewnętrznym, zł,

$V$  — objętość zwałowiska, m<sup>3</sup>,

$JE_t$  — jednostkowe zużycie energii transportu urobku, kWh/m<sup>3</sup>,

$C_F$  — średnia cena energii elektrycznej, zł/kWh; przyjęto  $C_F = 0,24$  zł/kWh

$u_E$  — mnożnik kosztów energii elektrycznej do wyznaczania kosztów transportu.

Koszt transportu urobku przedstawiono w tabeli 5. W przypadku zastosowania metryki euklidesowej najmniejszym kosztem charakteryzuje się zwałowisko o kształcie wycinka koła (136,0 mln zł). Następnie to o kształcie kwadratu (139,8 mln zł), natomiast nieregularny kształt podstawy zwałowiska spowodował zwiększenie kosztów transportu do 159,5 ml zł. Podobna sytuacja występuje dla postępu równoległego (metryka taksówkowa).

Koszt transportu urobku dla zwałowiska 2 wynosi 176,8 mln zł, 182,1 mln zł dla zwałowiska 1 i 215,2 mln zł dla zwałowiska 3.

TABELA 5

**Koszty transportu urobku na zwałowisku zewnętrznym w zależności od jego kształtu**

Wyszczególnienie	Jednostka	Zwałowisko 1	Zwałowisko 2	Zwałowisko 3
postęp wachlarzowy				
$KOP$ w postępie wachlarzowym	mln zł	139,8	136,0	159,5
$KOP$ w postępie równoległym	mln zł	182,1	176,8	215,2



## 5. Podsumowanie

Jak wynika z przeprowadzonej analizy trzech typowych kształtów zwałowisk zewnętrznych najmniejszą powierzchnię zajmie zwałowisko o podstawie kwadratu, natomiast im bardziej nieregularny będzie kształt zwałowiska tym większą powierzchnię ono zajmie.

Określenie przestrzennego położenia środka ciężkości bryły zwałowiska umożliwia porównanie jednostkowego zużycia energii transportu urobku. Nieregularny kształt zwałowiska powoduje jego zwiększenie. W analizowanym przypadku było ono większe od 14 i do 18% od energii potrzebnej na zwałowisku o podstawie kwadratu. Z punktu widzenia najmniejszej energochłonności transportu urobku zwałowisko powinno mieć podstawę wycinka koła i wachlarzowy postęp frontów zwałowych. Dzięki temu jednostkowe zużycie energii a co za tym idzie i koszty transportu będą mniejsze dodatkowo o 3% od zwałowiska o podstawie kwadratu.

Jednoznaczne określenie optymalnego kształtu zwałowiska zewnętrznego nie jest jednak zadaniem łatwym. Na jego kształt wpływ ma bardzo wiele czynników niekoniecznie związanych z przyjętą technologią zwałowania. Często o jego kształcie decydują uwarunkowania infrastrukturalne terenu przeznaczonego pod zwałowisko i koszty związane z ich przeniesieniem. Zdarza się także, że zwałowisko projektuje się tak, aby w całości zlokalizowane było w granicach jednej gminy, dzięki czemu ograniczony jest zakres spraw formalno-prawnych związanych z jego budową.

Należy jednak liczyć się z tym, że każda zmiana w symetryczności kształtu zwałowiska zewnętrznego spowoduje zwiększenie powierzchni potrzebnej do jego budowy oraz zwiększy koszty transportu urobku na tym zwałowisku.

### LITERATURA

- [1] *Kasztelewicz Z., Zajączkowski M.*: Koncepcja odwzorowania kosztów zwałowania na zwałowisku zewnętrznym. *Górnictwo i Geoinżynieria* nr 4, Kraków 2010
- [2] *Kawalec W.*: Koncepcja odwzorowania kosztów eksploatacji w procedurze generowania docelowego wyrobiska odkrywkowego. *Górnictwo Odkrywkowe* nr 5-6, Wrocław 2006
- [3] *Kawalec W.*: Przenośniki taśmowe dalekiego zasięgu do transportu węgla brunatnego. *Transport przemysłowy i maszyny robocze* nr 1, Wrocław 2009
- [4] *Wiśniewski S.*: Projektowanie kopalń odkrywkowych. Politechnika Wrocławska, Wrocław 1980