

## OBLICZENIA ROBÓT ZIEMNYCH PRZY MODERNIZACJI LINII KOLEJOWYCH

---

**Kamila Szwackiewicz**

mgr inż., Politechnika Gdańska, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, tel.: 58 348 6090, e-mail:kamszwac@pg.gda.pl

---

*Streszczenie. W artykule omówiono kolejny etap prac nad programem MUGO dotyczący obliczeń robót ziemnych. Program jest związany z modernizacją układów geometrycznych toru kolejowego. W pracy pokazano metodykę obliczania pól powierzchni nasypów na linii jednotorowej.*

*Słowa kluczowe: modernizacja linii kolejowych, roboty ziemne*

### 1. Wprowadzenie

Modernizacja linii kolejowych jest złożonym przedsięwzięciem budowlanym, które bardzo często przebiega w szeregu etapów. Na początku tego procesu tworzone są koncepcje wariantów, które podlegają ocenie w gronie eksperckim. Podejście to zmniejsza ryzyko popełnienia błędów decyzyjnych w tym ważnym etapie inwestycji [4]. Oceny wariantów przebiegu trasy dokonywać powinno się uwzględniając czynniki wpływające na jakość planowanej inwestycji oraz na aspekty ekonomiczne związane z kosztami i czasem jej realizacji. O ile czynniki ekonomiczne są stosunkowo łatwe do zdefiniowania, to problem jakości wymaga zdefiniowania licznych kryteriów. Zatem wybór najlepszego rozwiązania poprzedzany jest licznymi analizami wielokryterialnymi. Dzięki zastosowaniu współczesnych metod projektowania, wykorzystujących profesjonalne programy komputerowe obsługujące cyfrowe modele terenu, wybór odpowiedniego rozwiązania wydaje się być ułatwiony. Jednak liczne kryteria ograniczające powodują trudności w intuicyjnym wskazywaniu właściwych wariantów, przez co problem ten pozostaje nadal trudnym do rozwiązania. Przykładowo wyobrazić można sobie sytuację, kiedy to lepsze z uwagi na aspekt ekonomiczny rozwiązanie (tańsze) w porównaniu do droższego na etapie budowy, w dłuższym okresie czasu okaże się rozwiązaniem de facto droższym z uwagi na koszty utrzymania.

Dodatkowym aspektem, odróżniającym projektowanie modernizacji od projektowania nowych linii kolejowych, jest konieczność nawiązywania się do istniejącej linii, co narzuca projektantowi konieczność spełnienia kryterium, chociażby w postaci minimalizacji przesunięć osi toru [1, 2]. Co prawda, w niektórych sytuacjach, niewielka zmiana istniejącego układu pozwala na zachowanie istniejących budowli

ziemnych. Jednak w praktyce, projektowanie polegające tylko na dostosowywaniu się do ograniczeń nie pozwala na wykonanie efektywnego projektu modernizacji. W takiej sytuacji mniejsze nakłady wynikające z wykorzystania stanu istniejącego nie pociągają za sobą wyraźnych zysków w sensie jakości nowego układu geometrycznego. Przykładem odejścia od kryterium minimalnych przesunięć mogą być liczne inwestycje drogowe, kiedy to przebieg nowej trasy w znacznym procencie przebiega w nowej lokalizacji, natomiast wcześniejsza trasa staje się wariantem alternatywnym, zwiększającym lokalną przepustowość drogi. Zatem zadanie określenia kryteriów w procesie modernizacji oraz późniejsze wskazanie rozwiązania optymalnego jest zadaniem kluczowym na etapie planowania.

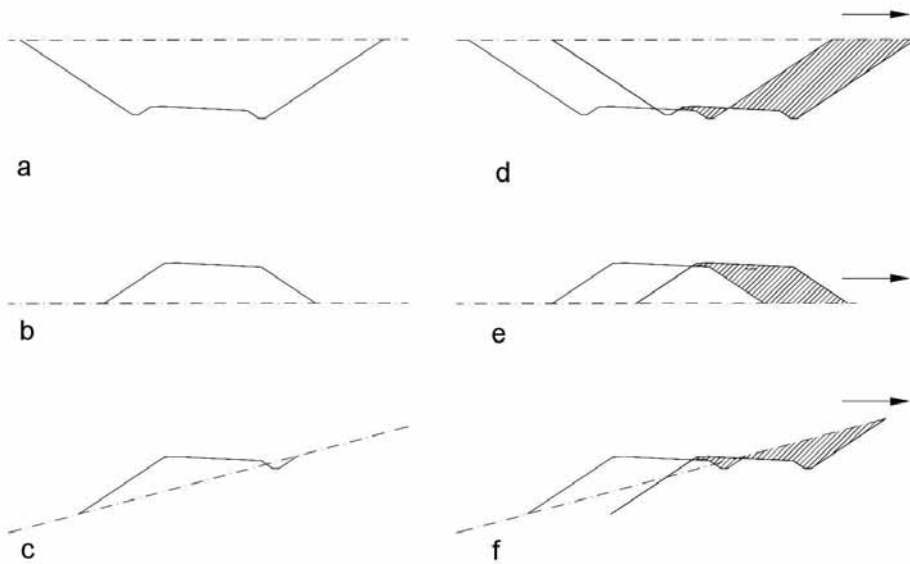
Z powyższych cech problemu modernizacji linii kolejowych wynika konieczność analizy wielokryterialnej. Do wyboru racjonalnych decyzji, co do ostatecznego wariantu, niezbędny wydaje się być proces optymalizacji parametrów układu geometrycznego, który spełni przyjęte założenia. W tym celu opracowywany jest program MUGO [3, 5-8], w którym układ geometryczny jest wynikiem działania algorytmów genetycznych uwzględniających takie kryteria jak: profil prędkości na danej trasie, przesunięcia osi toru oraz koszty związane z robotami ziemnymi. Kryteria te wydają się być kluczowe w pierwszym etapie tworzenia wariantów i mogą stanowić podstawę do dalszego procesu decyzyjnego uwzględniającego inne czynniki. W pracy nad programem należy ująć problem kosztów wynikających z robót ziemnych w postaci odpowiednich wag uwzględnianych w funkcjach oceniających. W ten sposób koszt przebudowy będzie miał ustalony wpływ na generowanie rozwiązań w programie MUGO. Zagadnienie obliczania zakresu robót ziemnych związanych z przesunięciem osi toru omówione jest również w pracach [1, 2].

## 2. Przyjęte założenia

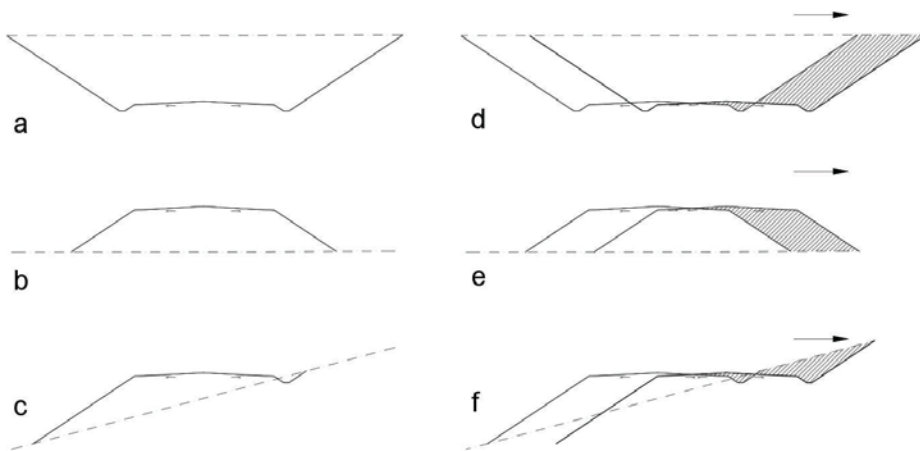
Wyznaczenie objętości robót ziemnych jest kolejnym elementem programu MUGO. Obliczenia te wykonywane są dla trzech różnych przypadków, które mogą mieć miejsce przy modernizacji linii kolejowej jednotorowej (rys. 1) i dwutorowej (rys. 2). W zależności od pochylenia terenu w przekroju poprzecznym mogą wystąpić następujące sytuacje:

- torowisko w danym przekroju usytuowane jest w wykopie (rys. 1a), przy czym głębokość wykopu nie przekracza 12 m,
- torowisko w danym przekroju usytuowane jest na nasypie (rys. 1b) a wysokość nasypu nie przekracza 12 m,
- torowisko w danym przekroju poprzecznym usytuowane jest częściowo w nasypie i w wykopie (rys. 1c).

Omawiany w pracy algorytm pozwala na obliczanie zakresu prac ziemnych dla dowolnie przyjętej długości toru. Wysokość nasypu lub głębokość wykopu podawana jest jako wartość średnia przypadająca na analizowaną długość toru.



Rys. 1. Przekroje poprzeczne linii jednotorowej: a, b, c w zależności od usytuowania torowiska względem poziomu terenu, d, e, f w położeniu pierwotnym i nowoprojektowanym



Rys. 2. Przekroje poprzeczne linii dwutorowej: a, b, c - w zależności od usytuowania torowiska względem poziomu terenu, d, e, f - w położeniu pierwotnym i nowoprojektowanym

W obliczeniach uwzględniono konieczność zastosowania dodatkowych łąw w przypadkach, gdy wysokość nasypu (względnie głębokość wykopu) przekracza 6 m. Założono również stałe pochylenie skarp wynoszące 1: 1,5, niezależnie od technologii umacniania ich zbocza. W proponowanym podejściu do obliczeń mas ziemnych zastosowano algorytmy, które dobierane są w zależności od zakresu przesunięć osi toru. Przykładowo, jeżeli wartość przesunięcia nie przekracza wartości szerokości torowiska przyjmuje się, że pozostawiany jest istniejący nasyp

(przekop), natomiast wynikiem obliczeń jest potrzebna ilość gruntu do rozbudowy nasypu lub do usunięcia z miejsca skarpy wykopu. W przypadku, gdy przesunięcie poprzeczne układu projektowanego względem istniejącego jest większe od wartości szerokości torowiska, objętość mas ziemnych będzie wyznaczana jak dla nowej budowli ziemnej. Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono przekroje poprzeczne linii, przy czym warianty d, e i f ilustrują (zakreskowane pole) obliczone pole dla przypadku kiedy nowe torowisko częściowo pokrywa stare.

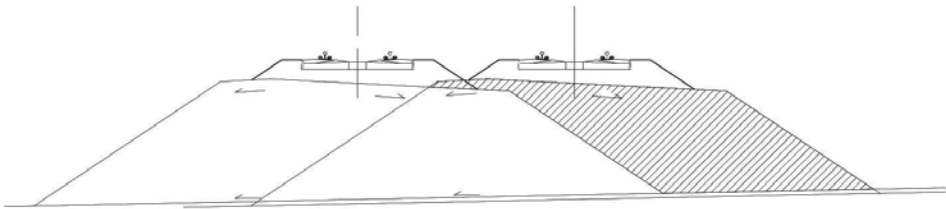
### 3. Obliczanie powierzchni przekroju poprzecznego nasypu

Podany przykład opisuje sposób, w jaki można obliczyć zakres robót ziemnych dla przypadku, w którym dany odcinek linii kolejowej znajduje się w całości w nasypie na linii jednotorowej. Do wyznaczenia zakresu robót ziemnych wykonano analizę, w której określono zależności występujące pomiędzy następującymi zmiennymi:

- przesunięciem osi toru,
- pochyleniem terenu,
- wysokością nasypu.

W pierwszej kolejności przyjęto, że występować mogą dwa przypadki obliczeniowe. Pierwszy przypadek obejmuje sytuacje, w których wartość przesunięcia osi toru jest mniejsza od połowy szerokości podstawy nasypu. Wówczas zachodzi potrzeba dobudowania części nasypu pod nowoprojektowane położenie linii kolejowej (rys. 3). Natomiast w drugim przypadku, odpowiedni zakres przesunięcia poprzecznego konstrukcji wymusza wyznaczenie objętości gruntu dla całego nasypu (rys. 4).

Znając wartość przesunięcia układu można określić objętość robót ziemnych. Dla pierwszego przypadku należy wyznaczyć pola powierzchni do wbudowania (rys. 3). Zakreskowane pole wyznacza zakres rozbudowy.

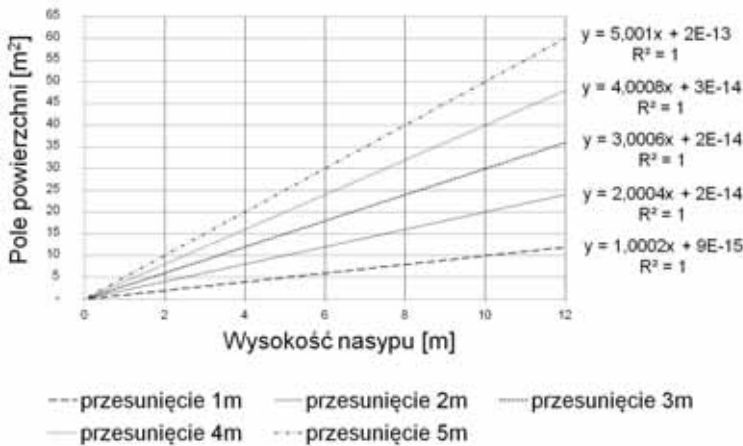


Rys. 3. Względne położenie nasypu istniejącego i nowoprojektowanego

Dla usprawnienia późniejszych obliczeń w programie MUGO postanowiono dokonać wstępnych obliczeń, które umożliwiłyby opisanie wartości pól w postaci funkcji zależnej od przesunięcia, wysokości nasypu i pochylenia terenu. Posłużono się arkuszem kalkulacyjnym i obliczono pola dla dowolnej wartości przesunięć mieszczących się w przedziale obejmującym wartości przesunięć do połowy sze-

rokości podstawy nasypu. Obliczenia wykonano dla różnych wartości wysokości nasypu z krokiem 0,1 m. Odpowiednie pola przekrojów poprzecznych obliczone zostały również dla różnego pochylenia terenu w przedziale  $\langle 0-6\% \rangle$ .

Obliczenia wykonano dzieląc analizowane obszary na proste figury geometryczne. Następnie zsumowano pola figur i otrzymano obszary, na których wykonane będą roboty ziemne. Wykonano wykresy zależności pola powierzchni od wysokości nasypu dla wszystkich przypadków pochylenia terenu. Na rys. 4 przedstawiono omawianą zależność dla pochylenia 2% i przesunięć od 1 do 5 m.



Rys. 4. Wykres zależności pola powierzchni od wysokości nasypu dla podanych przesunięć osi toru

Jak widać na wykresie wartość pola powierzchni jest zależna zarówno od wysokości nasypu, jak również od przesunięcia układu. Na podstawie tej analizy, poprzez zastosowanie regresji liniowej ustalono, że wartość pola przesunięcia ma charakter liniowy i wyrażona jest zależnością  $y = ax + b$ . Wartość  $b$  jest pomijalnie mała, natomiast współczynnik  $a$  jest w przybliżeniu równy przesunięciu układu projektowanego względem istniejącego. W analizie uwzględniono również pochylenie terenu w zakresie do 6%, z przeprowadzonych obliczeń wynika, że wpływ tego parametru jest minimalny, a błąd nie przekracza 0,5%. Zastosowanie przyjętych uproszczeń ma znikomy wpływ na obliczaną powierzchnię. Wartość pola powierzchni można więc opisać zależnością:

$$P_1 = wH \quad (1)$$

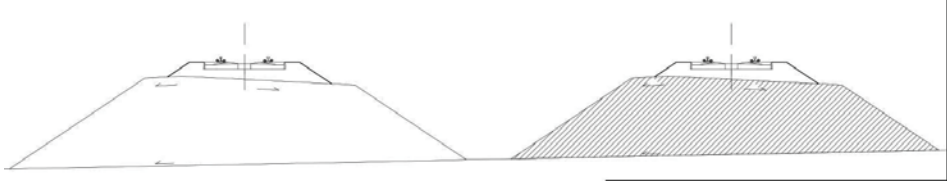
gdzie:

$P_1$  - pole powierzchni [ $m^2$ ],

$H$  - wysokość istniejącego nasypu [m],

$w$  - wartość przesunięcia układu projektowanego względem istniejącego [m].

Analogicznie zostały wykonane obliczenia obszaru dla nowego nasypu (drugi przypadek obliczeniowy - rys. 5).



Rys. 5. Łuk istniejący i projektowany

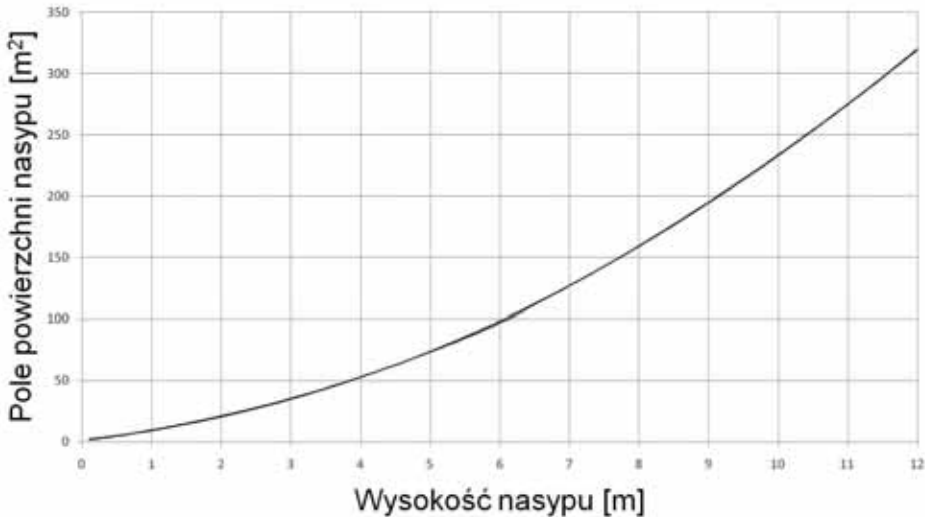
Podobnie obliczono pole wieloboku (pole nasypu w przekroju poprzecznym) stosując sumowanie pól prostych figur geometrycznych. Obliczono pole nasypu o różnej wysokości z dokładnością 0,1 m i nachyleniami w przedziale <0-6%>. Wyniki dla przypadku nasypów o pochyleniu terenu 2% przedstawiono w formie wykresu na rys. 6. Wykres ten opisuje zależność pomiędzy polem powierzchni nasypu a jego wysokością. Wykorzystując regresję nieliniową ustalono, że omawiana zależność dla nachylenia terenu 2% może zostać opisana wielomianem 4 stopnia:

$$P_2 = -0,0059H^4 + 0,1396H^3 + 0,6752H^2 + 8,4745H + 0,5153 \quad (2)$$

gdzie:

$P_2$  - pole powierzchni nasypu [ $m^2$ ],

$H$  - wysokość istniejącego nasypu [m].



$$y = -0,0059x^4 + 0,1396x^3 + 0,6752x^2 + 8,4745x + 0,5153$$

$$R^2 = 1,0$$

Rys. 6. Wykres zależności pola powierzchni nasypu od jego wysokości

W tabeli 1 przedstawiono równania dla różnych wartości pochylenia terenu.

Tabela 1. Równania pola powierzchni w zależności od nachylenia terenu

| Pochylenie [%] | Pole powierzchni [m <sup>2</sup> ]                            | Współczynnik korelacji R <sup>2</sup> |
|----------------|---|---------------------------------------|
| 0%             | $P_2 = 1,6563H^2 + 6,1217H + 1,8389$                          | R <sup>2</sup> = 1                    |
| 1%             | $P_2 = 1,6561H^2 + 6,1085H + 1,8397$                          | R <sup>2</sup> = 1                    |
| 2%             | $P_2 = -0,0059H^4 + 0,1397H^3 + 0,6755H^2 + 8,4762H + 0,5153$ | R <sup>2</sup> = 1                    |
| 3%             | $P_2 = -0,006H^4 + 0,1417H^3 + 0,676H^2 + 8,4536H + 0,5506$   | R <sup>2</sup> = 1                    |
| 4%             | $P_2 = -0,0063H^4 + 0,1479H^3 + 0,6482H^2 + 8,4962H + 0,5739$ | R <sup>2</sup> = 1                    |
| 5%             | $P_2 = -0,0068H^4 + 0,1554H^3 + 0,6293H^2 + 8,4846H + 0,6468$ | R <sup>2</sup> = 1                    |
| 6%             | $P_2 = -0,0068H^4 + 0,1562H^3 + 0,6332H^2 + 8,4776H + 0,672$  | R <sup>2</sup> = 1                    |

Po wyznaczeniu powierzchni dla obu przypadków obliczeniowych można w prosty sposób wyznaczyć zakres robót ziemnych na przyjętej długości. Objętość bryły można obliczyć korzystając z równania:

$$V = Pl \quad (3)$$

gdzie:

$P$  - pole powierzchni [m<sup>2</sup>],

$l$  - długość rozpatrywanego odcinka [m],

Obliczenia robót ziemnych można wykonać korzystając z wyliczonych w programie MUGO przesunięć osi toru projektowanego względem istniejącego na przyjętej długości toru.

#### 4. Podsumowanie

Obliczenia robót ziemnych są jednym z kolejnych elementów, które będą zaimplementowane w programie MUGO. Dzięki określeniu tych wartości możliwa będzie analiza kosztów robót ziemnych wymaganych przy modernizacji linii kolejowych.

Koszty wynikające z przesunięcia układu projektowanego względem istniejącego będą obliczane z uwzględnieniem wielu różnych czynników, do których można zaliczyć np.:

- wartości przesunięć osi toru projektowanego względem istniejącego,
- ukształtowanie poprzeczne terenu,
- wysokości nasypów lub głębokości przekopów,
- warunki gruntowe i wodne,
- lokalizacja linii,

- miejsce wydobycia gruntu na podtorze,
- klasa i standard konstrukcyjny linii,
- promienie łuków kołowych.

Dalszym etapem będzie określenie współczynników dotyczących kosztów modernizacji. Wartości te są elementem niezbędnym do budowy funkcji celu używanej przy optymalizacji przebudowy układów torowych.

## Literatura

- [1] Bałuch H., Bałuch M., Układy geometryczne toru i ich deformacje. KOW, Warszawa 2010.
- [2] Bałuch M., The assessment of changes of track geometrical layout in the process of feasibility studies of railways modernization. Archives of Civil Engineering, Nr 4, 2006.
- [3] Bałuch M., Szwaczkiewicz K., Modernizacja łuków koszowych z wykorzystaniem programu MUGO. Przegląd Komunikacyjny, Miesięcznik naukowo-techniczny Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji RP, Nr 9-10, 2011.
- [4] Bogdaniuk B., Towpik K., Budowa, modernizacja i naprawy dróg kolejowych. KOW, Warszawa 2010.
- [5] Szwaczkiewicz K., Komputerowe wspomaganie zmian modernizowanych układów geometrycznych toru. IV Konferencja Naukowo-Techniczna „Projektowanie, budowa i utrzymanie infrastruktury w transporcie szynowym INFRASZYN 2011”, 2011.
- [6] Szwaczkiewicz K., Komputerowe wspomaganie zmian modernizowanych układów geometrycznych toru kolejowego z wykorzystaniem programu MUGO. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Inżynieria Lądowa i Wodna (1). Gdańsk, 2012.
- [7] Szwaczkiewicz K., Komputerowe wspomaganie modernizacji łuków poziomych na liniach kolejowych. Technika Transportu Szynowego. - 2012, nr 9, Radom 2012.
- [8] Szwaczkiewicz K., Koncepcja zastosowania algorytmów genetycznych przy modernizacji układów geometrycznych.