

*Paweł Sysik\*, Anna Siemińska-Lewandowska\*\**

## ZASTOSOWANIE METODY ZBIORÓW LOSOWYCH DO OBLICZEŃ TUNELU BUDOWANEGO NOWĄ METODĄ AUSTRIACKĄ (NATM)

---

W budownictwie podziemnym problem ryzyka związanego z budową tuneli jest nieodłącznym składnikiem procesu inwestycyjnego. Ryzyko to spowodowane jest istnieniem szeregu różnego rodzaju niepewności, które występują najczęściej w rozpoznaniu geotechnicznym. Wynikają one z dwóch źródeł:

- 1) z naturalnej zmienności parametrów, czyli rozrzutu danych,
- 2) z ograniczonego ich rozpoznania, czyli braku wiedzy.

Wobec trudności w matematycznym ujęciu tych niepewności, w praktyce uwzględnia się je poprzez osąd inżynierski oraz przyjmowanie parametrów po bezpiecznej stronie. Wzrost znaczenia analizy ryzyka (np. w procesie przetargowym) oraz rozwój metod numerycznych nakazują poszukiwanie sposobów bardziej formalnego ujęcia niepewności w zagadnieniach geotechnicznych.

W artykule została opisana metoda matematycznej reprezentacji niepewności oparta na teorii zbiorów losowych. Jej zastosowanie przedstawiono na przykładzie budowy tunelu kolejowego wykonywanego nową metodą austriacką (NATM).

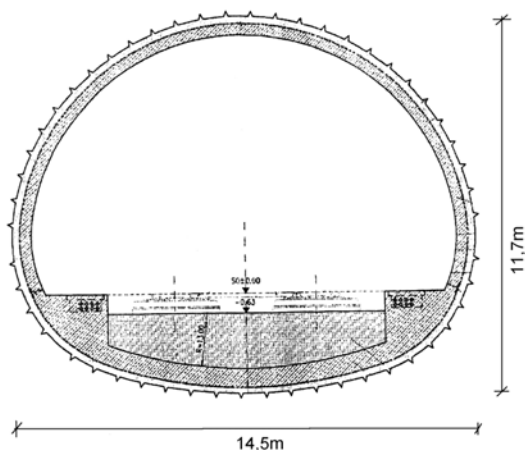
Tunel o długości 1400 m, przebiega w utworach wapiennych, na głębokości około 12 m pod powierzchnią terenu. W utworach tych wyróżniono trzy wydzielenia geotechniczne: dwie warstwy wapienia (wapień I i wapień II) o zróżnicowanym stopniu spękania oraz trzecią, leżącą ponad nimi, uformowaną ze zwietrzliny wapieni. Zwierciadło wody gruntowej znajduje się poniżej poziomu planowanych robót, dlatego nie przewidziano odwodnienia na czas budowy. Izolację wodoszczelną zaplanowano jako zewnętrzną membranę wokół obudowy stałej. Tunel zaprojektowano jako pojedynczy przekrój złożony z odcinków łukowych o róż-

---

\* ILF Consulting Engineers Polska

\*\* Politechnika Warszawska, Warszawa

nych promieniach (rys. 1), a gabaryty wyrobiska wynoszą: 14,5 m szerokości i 11,7 m wysokości. W tunelu mieszczą się dwa torowiska na podbudowie sztywnej oraz chodniki służące jako drogi ewakuacyjne i przejścia dla obsługi technicznej. Budowa tunelu przebiega w dwóch fazach — w pierwszej jest drążona kalota, a następnie z kilkusetmetrowym odstępem — sztrośa i spąg. Skala jest urabiana za pomocą materiałów wybuchowych oraz maszyn skrawających. Podatna obudowa tymczasowa wyrobiska składa się z kotew skalnych mocowanych zaprawą cementową, siatki stalowej i betonu natryskowego o grubości 25 cm. Po zakończeniu procesu deformacji obudowy tymczasowej wykonuje się izolację i sztywną obudowę stałą z wodoszczelnego betonu zbrojonego o grubości 50 cm w części spągowej i 35 cm w części kalotowej. Na końcu wykonuje się podbudowę z betonu B15 i torowisko oraz montuje się wyposażenie tunelu.

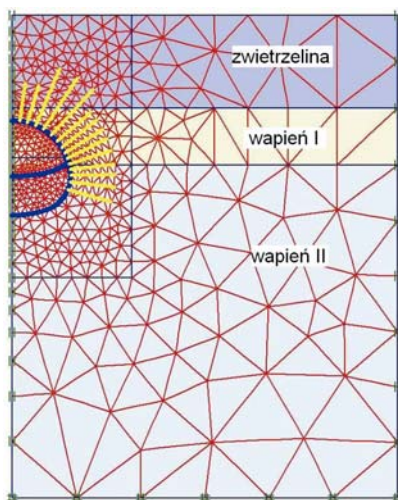


**Rys. 1.** Przekrój poprzeczny tunelu

Istotą prac tunelowych nową metodą austriacką jest dopuszczenie do powstania odkształceń wyrobiska i obudowy tymczasowej, które są dla każdego projektu wyznaczane teoretycznie, a następnie weryfikowane podczas drążenia tunelu na podstawie pomiarów konwergencji. Teoretyczna prognoza wartości pionowych i poziomych przemieszczeń jest jednym z najtrudniejszych etapów projektowania i wiąże się z koniecznością oceny ryzyka budowy. Podczas definiowania parametrów wytrzymałościowych skał (lub gruntów) i niektórych elementów konstrukcyjnych pojawia się wspomniane na wstępie zagadnienie niepewności. Uwzględnienie niepewności w procesie obliczeniowym pozwala przewidzieć zakres możliwych deformacji obudowy, przygotować scenariusze jej modyfikacji i szacować ryzyko uszkodzenia konstrukcji podczas budowy.

Analizę obliczeniową procesu drążenia omawianego powyżej tunelu przeprowadzono metodą elementów skończonych, programem PLAXIS v8 [1]. Do zamodelowania warstw gruntu zastosowano model „Hardening Soil”.

Obudowę tymczasową z betonu natryskowego zamodelowano elementami belkowymi, a kotwy skalne — elementami „geotextile”. Siatkę stworzono z 15-węzłowych elementów skończonych, a przedstawiono ją na rysunku 2.

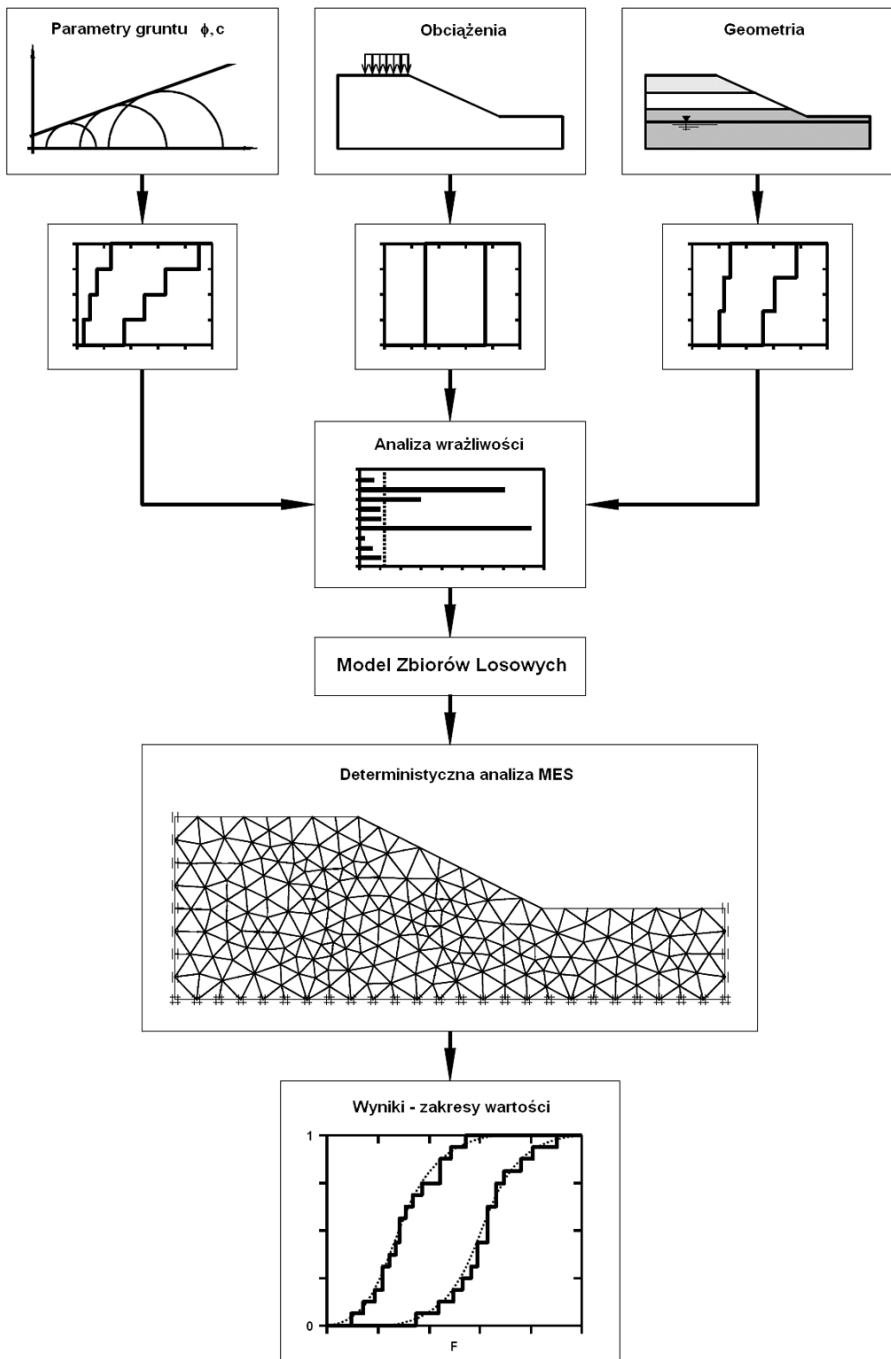


Rys. 2. Siatka MES

Symulację numeryczną kolejnych faz budowy wykonano z uwzględnieniem odprężenia wyrobiska, tzn. przekazaniem części obciążeń na górotwór i wykonaniem obudowy tymczasowej, kolejno, w kalocie i w spągu. Na koniec obliczono współczynnik bezpieczeństwa poprzednich faz poprzez redukcję parametrów wytrzymałościowych gruntu.

Istotnym elementem projektowania budowli podziemnych jest opisanie wydzielonych warstw geotechnicznych konkretnymi wartościami parametrów uzyskanych z kilku źródeł informacji. Zazwyczaj niewielka ilość danych z badań i ich znaczny rozrzut sprawia, że trudno te wartości wyznaczyć. Przedstawienie parametru w postaci rozkładu prawdopodobieństwa i wybranie wartości na określonym poziomie ufności wydaje się niemożliwe wobec konieczności zakładania funkcji rozkładu prawdopodobieństwa. Przyjmowanie parametrów po tzw. „bezpiecznej stronie” jest z kolei zbyt konserwatywne. Dodatkowo, określenie najbardziej niekorzystnej kombinacji parametrów w złożonych modelach nieliniowych nie jest oczywiste. W zagadnieniach geotechnicznych najbardziej odpowiednie wydaje się przedstawienie parametrów wejściowych w postaci zakresów wartości, bez rozkładu prawdopodobieństwa. Wówczas można wykonać obliczenia metodą zbiorów losowych [2, 3]. Schemat ideowy omawianego podejścia przedstawia rysunek 3, a szczegóły opisano dalej.

Do określenia wartości parametrów dla potrzeb analizy tunelu przeprowadzono niewielką liczbę badań. Na ich podstawie określono wartości parametrów wydzielonych warstw skał w postaci przedziałów wartości. Dodatkowo korzystano z opinii eksperta, który swoje propozycje przedstawił również w postaci przedziałów wartości.



Rys. 3. Schemat ideowy metody zbiorów losowych

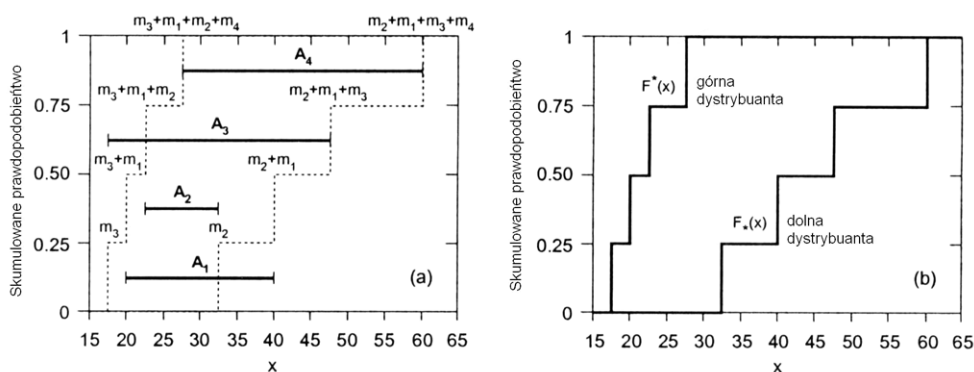
Dane zestawiono w tabeli 1. Jako dodatkowe, niedostateczne rozpoznane dane, przyjęto wartości modułu sprężystości betonu natryskowego świeżego i dojrzałego oraz współczynniki odprężenia. Przedstawiono je w również w postaci zakresów.

TABELA 1

**Przedziały wartości parametrów geotechnicznych wydzielonych warstw skał**

Źródło informacji \ Parametr	$c$ kN/m <sup>2</sup>	$\varphi$ °	$K_0$ –	$E_{oed}^{ref}$ MN/m <sup>2</sup>
Zwierzelina:				
Wyniki badań	2,7÷4,6	25,1÷26,7	0,41÷0,51	27,0÷42,0
Opinia eksperta	3,3÷4,9	25,4÷27,3	0,44÷0,54	33,0÷48,0
Wapień I:				
Wyniki badań	7,0÷26,0	15,6÷23,4	0,47÷0,71	21,0÷38,0
Opinia eksperta	13,0÷44,0	17,4÷26,1	0,53÷0,74	24,0÷47,0
Wapień II:				
Wyniki badań	12,0÷31,0	15,6÷23,4	0,47÷0,71	23,0÷54,0
Opinia eksperta	18,0÷49,0	17,4÷26,1	0,53÷0,74	32,0÷66,0

Sposób konstrukcji wykresu obrazującego dane w postaci przedziałów wartości z przypisanym prawdopodobieństwem (zbiorów losowych)  $A_i = \{x|x \in [l_i, u_i]\}$  przedstawiono na rysunku 4.



**Rys. 4.** Konstrukcja zbiorów losowych

Jest on przykładowo skonstruowany dla zakresów parametrów pochodzących z czterech źródeł. Oś pozioma przedstawia wartości parametrów, oś pionowa jest osią sumowanego prawdopodobieństwa. Wielkość  $m_i$  jest prawdopodobieństwem wystąpienia parametru

z przedziału  $A_i$ . Jest ona miarą zaufania dla danego źródła informacji. Można przyjąć, że źródła informacji  $A_1 \div A_4$  są jednakowo wiarygodne i zakresom wartości z tych źródeł przypisać równe prawdopodobieństwa  $m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = 1/4$ .

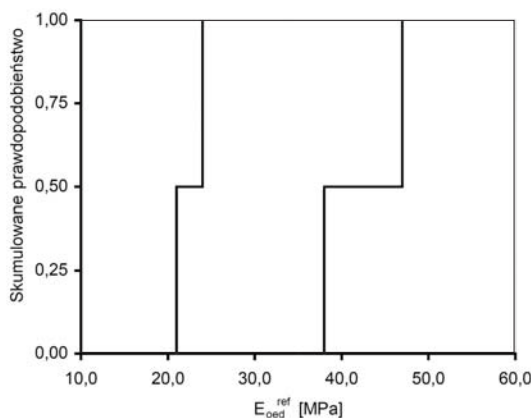
Zebrane informacje można zilustrować na wykresie, konstruując górną i dolną dystrybuantę prawdopodobieństwa, które są zdefiniowane odpowiednio wzorem (1) i (2):

$$F_*(x) = \sum_{i: x \geq u_i} m(A_i) \quad (1)$$

$$F^*(x) = \sum_{i: x \geq l_i} m(A_i) \quad (2)$$

Stanowią one obwiednie dla wszystkich dystrybuant prawdopodobieństwa, które są zgodne z danymi. Gdyby zawęzić zdefiniowane przedziały wartości (np. poprzez wykonanie dodatkowych badań), dolna i górna dystrybuanta będą się zbliżać do siebie. W granicznym przypadku przedziały zredukują się do pojedynczych wartości. Wtedy  $F_*(x) = F^*(x)$  i przy odpowiednim „bogactwie” danych ( $i = \infty$ ) uzyskuje się, tak jak w klasycznej teorii prawdopodobieństwa, jedną ciągłą dystrybuantę prawdopodobieństwa.

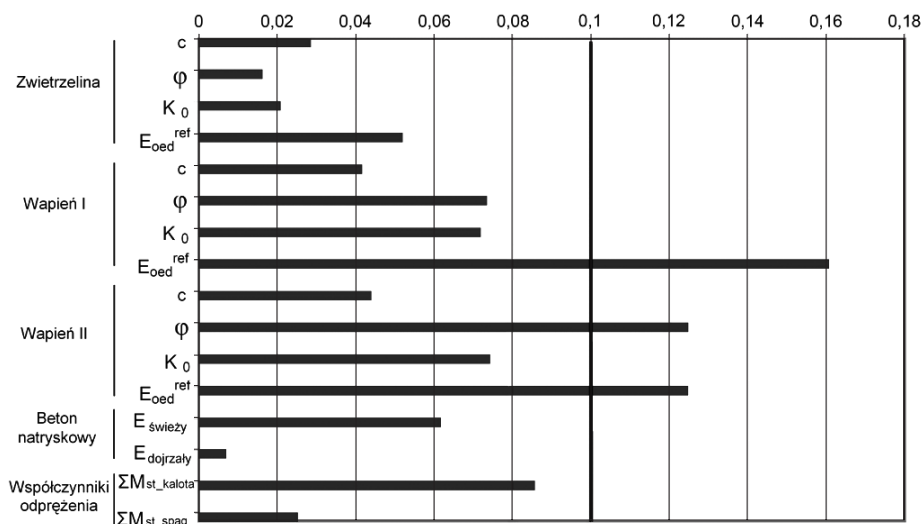
W analogiczny sposób skonstruowano wykresy dla parametrów wejściowych w omawianej analizie tunelu, przy czym, jak podano w tabeli 1, dysponowano danymi z dwóch źródeł informacji (wyniki badań i opinia eksperta). Potraktowano je jako jednakowo wiarygodne i zakresom z nich otrzymanym przypisano prawdopodobieństwo 1/2. Przykładową dolną i górną dystrybuantę prawdopodobieństwa przedstawiono na rysunku 5. W ten sam sposób skonstruowano wykresy dla czterech analizowanych parametrów wejściowych trzech wydzielonych warstw skalnych, których zakresy wartości podano w tabeli 1, oraz moduły sztywności betonu natryskowego i współczynników odprężenia.



Rys. 5. Wykres zbioru losowego dla modułu ściśliwości wapienia I

W celu określenia wpływu zmian poszczególnych parametrów na zmianę wyników obliczeń przeprowadzono analizę wrażliwości modelu numerycznego. To zredukowało liczbę zmiennych losowych, skróciło czas dalszych obliczeń i pozwoliło na ocenę dokładności rozpoznania parametrów. Dla każdego parametru obliczono względny współczynnik wrażliwości  $n_{SS}$  określony wzorem (3):

$$n_{SS} = \frac{\text{względna zmiana wyniku}}{\text{względna zmiana wartości parametru}} \times \text{współczynnik wielkości przedziału wartości parametru} \quad (3)$$



Rys. 6. Względny współczynnik wrażliwości

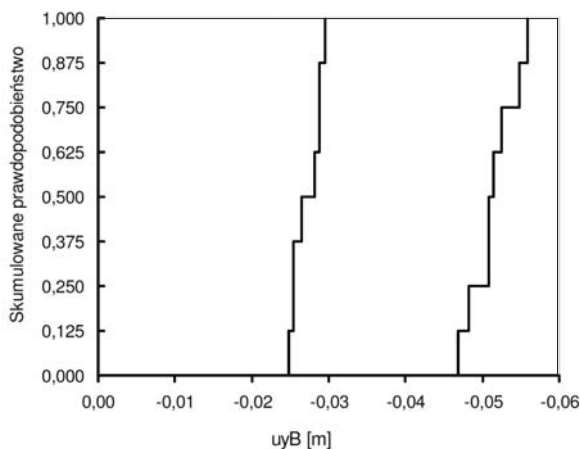
Na rysunku 6 przedstawiono wartości względnego współczynnika wrażliwości dla poszczególnych zmiennych parametrów.

Wartość progową wyniku wrażliwości określono na poziomie 10%, przyjmując w konsekwencji do dalszych obliczeń trzy zmienne parametry:

- 1) moduł ściśliwości wapienia I,
- 2) moduł ściśliwości wapienia II,
- 3) kąt tarcia wewnętrznego wapienia II.

Są to parametry najbardziej ważne w analizie przemieszczeń wyrobiska. Pozostałe parametry potraktowano jako stałe i przyjęto do obliczeń ich średnie wartości przedziałów. Następny krok analizy polegał na oszacowaniu możliwych zakresów przemieszczeń obudowy odpowiadających zakresom wartości trzech wybranych powyżej parametrów. W tym

celu do deterministycznego modelu obliczeniowego wprowadzano różne kombinacje modułu ścisłości wapienia I, modułu ścisłości wapienia II oraz kąta tarcia wewnętrznego wapienia II. Algorytm wprowadzania danych jest przedstawiony w pozycji literaturowej [4]. W rezultacie otrzymano dystrybuanty przemieszczenia obudowy pokazujące zakres możliwych jej deformacji (rys. 7).



Rys. 7. Dystrybuanty przemieszczenia pionowego korony tunelu  $u_{yB}$

Wyniki obliczeń porównano z wartościami pomierzonymi podczas budowy tunelu. Stwierdzono zgodność wyników obliczeń z pomiarami, tzn. pomiar zawierał się w przedziale możliwych przemieszczeń wyznaczonym w analizie.

W podsumowaniu należy stwierdzić, że teoria zbiorów losowych stanowi alternatywną propozycję wobec klasycznej teorii prawdopodobieństwa dla matematycznej reprezentacji niepewności. Jej przewagą jest to, że wykorzystuje się przedziały wartości parametrów, a nie funkcje rozkładu prawdopodobieństwa, które trudno określić przy niewielkiej liczbie danych. Metoda ta pozwala na uwzględnienie informacji z różnych źródeł, co często się zdarza w przypadku kompletowania dokumentacji geologiczno-inżynierskiej. Sposób, w jaki prezentowane są parametry wejściowe oraz wyniki analizy, ułatwia orientację w stopniu rozpoznania gruntu i możliwym zachowaniu się konstrukcji. Można się spodziewać, że wobec rosnących wymagań co do bezpieczeństwa i ekonomiki budowy podziemnych oraz stałego rozwoju w dziedzinie metod numerycznych metoda zbiorów losowych może być w przyszłości szeroko stosowana na dużą skalę w praktyce. Należy pamiętać, że w analizie zagadnień geotechnicznych bardzo ważną rolę odgrywa ocena parametrów geotechnicznych oparta na wiedzy i doświadczeniu inżynierskim. Wskazane jest również krytyczne podejście do komputerowych wyników obliczeń przemieszczeń konstrukcji. Proponowane w artykule zastosowanie metody zbiorów losowych może wspomóc proces projektowania, ale nie zastąpi opinii doświadczonego eksperta.



## LITERATURA

- [1] *Brinkgreve R.B.J.*: PLAXIS, Finite element code for soil and rock analyses, Users manual. Rotterdam, Balkema 2000
- [2] *Schweiger H.F., Peschl G.M.*: Numerical analysis of deep excavations utilizing random set theory. „Proc. of Geotechnical Innovations”, Stuttgart, Germany, Brinkgreve, Schad, Schweiger & Willand, 2004, 277–294
- [3] *Schweiger H.F., Thurner R., Pöttler R.*: Reliability Analysis in Geotechnics with Deterministic Finite Elements — Theoretical Concepts and Practical Application. The international Journal of Geomechanics, 1(4), 2001, 389–413
- [4] *Sysik P.*: Zastosowanie teorii zbiorów losowych w obliczeniach metody elementów skończonych do symulacji budowy tunelu. Warszawa, Politechnika Warszawska 2004 (magisterska praca dyplomowa)