

**Grzegorz WRZESIŃSKI, Zbigniew LECHOWICZ**

Katedra Geoinżynierii SGGW w Warszawie  
Department of Geotechnical Engineering WULS – SGGW

## **Ocena stateczności etapowo budowanego nasypu na podłożu organicznym**

### **Stability assessment of stage-constructed embankment on organic subsoil**

**Słowa kluczowe:** grunty organiczne, stateczność nasypu, wytrzymałość na ścinanie  
**Key words:** organic soils, embankment stability, shear strength

#### **Wprowadzenie**

Posadowienie nasypów na słabych gruntach organicznych stwarza szczególne problemy. Najbardziej oczywiste z nich to duże pionowe i poziome odkształcenia podłoża, pojawiające się podczas budowy i po jej zakończeniu. Przemieszczenia podłoża występują już w okresie budowy i trwają bardzo długo, również na skutek pełzania. Mała początkowa wytrzymałość gruntów organicznych często utrudnia zapewnienie stateczności nasypu, w związku z czym obciążenie musi być przykładane etapowo lub podłoże powinno być wcześniej wzmocnione (Lechowicz i Szymański 2002a, b). Jednym ze skutecznych i eko-

nomicznych sposobów wzmocnienia podłoża jest jego wstępna konsolidacja spowodowana etapową budową nasypu.

W przypadku etapowej budowy nasypu na gruntach organicznych należy przeprowadzić analizę stateczności na każdym etapie realizacji, tak aby wysokość poszczególnych warstw nasypu oraz tempo ich wznoszenia dostosować do wytrzymałości na ścinanie podłoża w danej fazie budowy. W pierwszym etapie wytrzymałość na ścinanie określa się dla podłoża w stanie naturalnym, a w etapach następnych należy uwzględnić wzrost wytrzymałości spowodowany przyrostem naprężenia efektywnego podczas procesu konsolidacji. Wzrost wytrzymałości gruntów organicznych uzależniony jest głównie od historii jego obciążenia oraz od intensywności rozpraszania nadwyżki ciśnienia wody w porach, czyli od przepuszczalności i odkształcalności gruntu.

Analiza stateczności nasypu prowadzona przy zastosowaniu naprężeń całkowitych w kolejnych etapach budowy wymaga prognozy zmiany wytrzymałości na ścinanie, wywołanej częściową konsolidacją podłoża organicznego. Do obliczeń wzrostu wytrzymałości na ścinanie konieczna jest znajomość zmiany stanu naprężenia efektywnego w procesie konsolidacji. Prognoza przebiegu konsolidacji podłoża organicznego powinna uwzględniać nieliniowość konsolidacyjnych charakterystyk, jak również duże zmiany geometrii podłoża (Szymański 1991). Właściwe oszacowanie wzrostu wytrzymałości na ścinanie podłoża organicznego podczas etapowego wznoszenia nasypu jest czynnikiem decydującym o poprawnej ocenie jego stateczności.

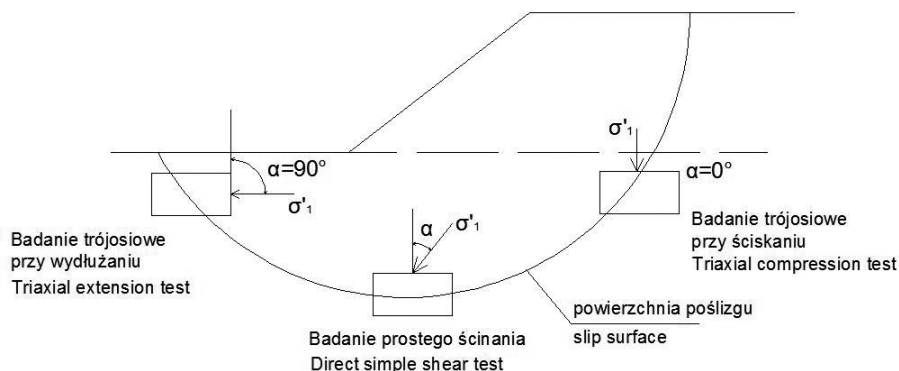
Istnieje wiele sposobów, mniej lub bardziej skomplikowanych, określania i późniejszego uwzględniania w analizie stateczności wzrostu wytrzymałości na ścinanie bez odplywu. Metody prognozy wzrostu wytrzymałości na ścinanie można podzielić na trzy grupy (Lechowicz 1992). Pierwszą i drugą stanowią metody, w których przebieg procesu konsolidacji opisany jest w jednowymiarowym stanie odkształcenia, a stan naprężenia efektywnego reprezentowany jest przez składową pionową naprężenia efektywnego. Wydzielenie drugiej grupy metod wynika z dodatkowego uwzględnienia wpływu historii naprężenia na zmianę wytrzymałości na ścinanie. Trzecią grupę stanowią metody, w których przebieg procesu konsolidacji opisany jest w dwuwymiarowym stanie odkształcenia, a stan naprężenia efektywnego reprezentowany jest przez składową pionową i poziomą naprężenia efektyw-

nego. Wyboru metody prognozy wzrostu wytrzymałości na ścinanie dokonuje się na podstawie analizy czynników decydujących o charakterze przebiegu procesu wzmocnienia, występujących w terenie w rozpatrywanym przypadku.

Przy posadowieniu wysokich nasypów na podłożu organicznym o znacznej miąższości (szczególnie przy wieloetapowej budowie nasypu) przyjęcie jednakowego przebiegu procesu wzmocnienia wzdłuż całego nasypu jest zbyt dużym uproszczeniem. Wyniki analizy numerycznej wykazują, że obciążenie podłoża organicznego nasypem powoduje powstanie w podłożu stref o znacznym zróżnicowaniu zakresu i przebiegu zmiany naprężenia oraz ciśnienia wody w porach. Wzdłuż potencjalnej powierzchni poślizgu następuje istotna zmiana kierunków naprężeń głównych, a tym samym wywoływany jest różny mechanizm zniszczenia (rys. 1). Każdej z wyszczególnionych stref wzdłuż potencjalnej powierzchni zniszczenia odpowiada inny kąt obrotu kierunków naprężeń głównych ( $\alpha$ ) – Zdravković i inni (2002).

Prowadząc obliczenia wzrostu wytrzymałości na ścinanie, zaleca się wydzielenie w podłożu organicznym pionowych stref, dla których będą prowadzone obliczenia w jednowymiarowym stanie odkształcenia. Aby uzyskać poprawne wyniki, należy zwrócić uwagę na właściwy dobór wartości wywołanych obciążeń oraz wartości parametrów wzrostu wytrzymałości na ścinanie dla każdej warstwy obliczeniowej, które powinny odpowiadać zachowaniu się podłoża w analizowanej strefie.

W artykule, ze względu na złożony charakter zjawiska oraz trudności okre-



RYSUNEK 1. Mechanizmy zniszczenia podłoża w poszczególnych strefach potencjalnej powierzchni zniszczenia (Zdravković i in. 2002)

FIGURE 1. Subsoil failure mechanisms in different zones of potential failure surface (Zdravković et al. 2002)

ślenia wzmocnienia podłoża organicznego przed kolejnym etapem obciążenia, przeprowadzono analizę stateczności nasypu metodą równowagi granicznej na podstawie prognozowanej wytrzymałości na ścinanie bez odpływu w wydzielonych strefach o różnym mechanizmie zniszczenia. Dla porównania otrzymanych wyników wykonano również obliczenia, przyjmując dla całego podłoża jeden mechanizm zniszczenia.

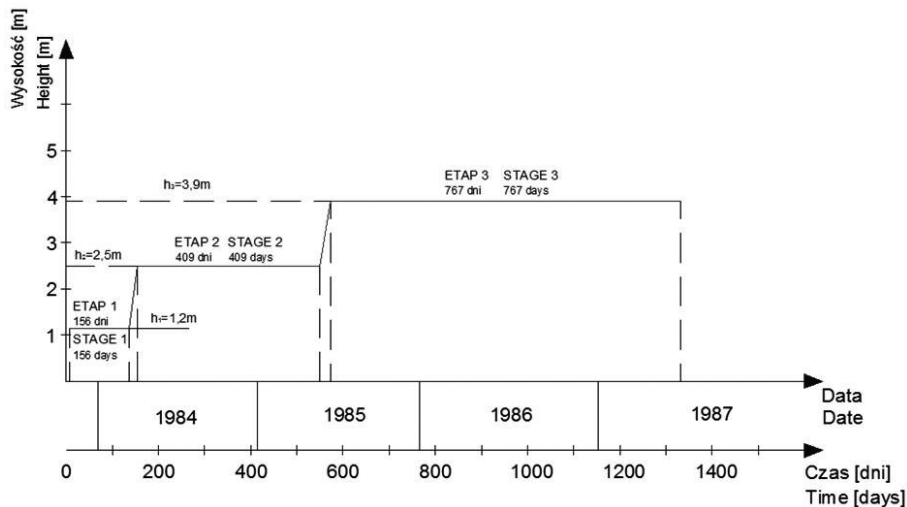
### Obiekt doświadczalny w Antoninach

Obiekt doświadczalny w Antoninach powstał w ramach współpracy Katedry Geoinżynierii Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie ze Szwedzkim Instytutem Geotechnicznym. Obiekt zlokalizowano w dolinie rzeki Noteć, około 4 km na południowy zachód od miejscowości Białośliwie w województwie wielkopolskim. Nasyp wzniesiono na płaskim terenie zagospodarowanym rolniczo, około 100 m na

południe od rzeki Noteć (Wolski i in. 1988).

Nasyp budowano etapowo w latach 1983–1987 do wysokości 3,9 m. Łączny czas jego budowy wynosił 1332 dni. Miąższości poszczególnych warstw to: 1,2, 1,3 i 1,4 m. Czas budowy w pierwszym etapie wyniósł 6 dni, a w następnym – odpowiednio 7 i 18 dni. Z kolei czas budowy wraz z przerwą technologiczną trwał w przypadku pierwszego etapu 156 dni, drugiego – 409 dni, a trzeciego – 767 dni (rys. 2).

W podłożu znajdują się dwie warstwy gruntów organicznych o łącznej miąższości 7,8 m. Bezpośrednio pod powierzchnią terenu zalega 3,1-metrowa warstwa torfu, podścielona 4,7-metrową warstwą gytii. Badania właściwości gruntów organicznych przeprowadzone przez Katedrę Geoinżynierii SGGW w Warszawie wykazują, że warstwa torfu składa się głównie ze średnio rozłożonego torfu oraz torfu amorficznego. W gytii wyróżniono trzy warstwy różniące się zawartością części organicznych i węgla wapnia. Podłoże organiczne to



RYSUNEK 2. Harmonogram realizacji nasypu w Antoninach (Wolski i in. 1988)  
 FIGURE 2. Construction schedule of embankment in the Antoniny site (Wolski i in. 1988)

grunty prekonsolidowane o współczynniku prekonsolidacji OCR wynoszącym dla torfu 3–5, a dla gytii 1,5–2,5.

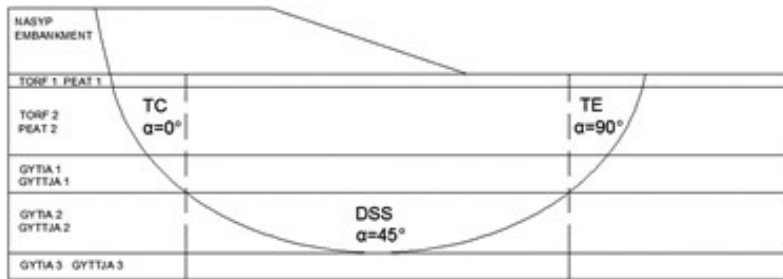
Torfowo-gytiove podłoże podścielone jest warstwą piasku drobnego, w którym występuje napięte zwierciadło wody gruntowej. Po nawierceniu stabilizuje się ono na wysokości 1,5 m powyżej powierzchni terenu. Ciśnienie artezyjskie powoduje, że przy małym ciężarze objętościowym torfu i gytii składowa pionowa naprężenia efektywnego w podłożu organicznym przed obciążeniem wynosiła od 3 do 10 kPa (Hartlen i Wolski 1996). Swobodne zwierciadło wody gruntowej występuje w wierzchniej warstwie torfu na głębokości 0,2 m pod powierzchnią terenu.

### Prognoza wzrostu wytrzymałości

Wyniki analizy numerycznej (Wrześniński i Lechowicz 2012) wykazują, że obciążenie podłoża organicznego nasypem

powoduje powstanie w podłożu stref o różnym zakresie i przebiegu zmian naprężenia oraz ciśnienia wody w porach. Wzdłuż potencjalnej powierzchni poślizgu w momencie zniszczenia następuje zmiana kierunków naprężeń głównych, a tym samym wywołany jest różny mechanizm zniszczenia. Obliczenia numeryczne po zakończeniu II etapu budowy nasypu pozwoliły na wydzielenie w podłożu stref o różnych mechanizmach zniszczenia (rys. 3), które można obserwować w badaniu trójosiowym przy ścisłaniu (TC), badaniu trójosiowym przy wydłużaniu (TE) oraz w badaniu prostego ścinania (DSS).

Każdą strefę podzielono na warstwy obliczeniowe, odpowiadające warstwom geotechnicznym o jednakowej wytrzymałości na ścinanie, bez odpływu ( $\tau_{fu}$ ), którą wyznaczono na podstawie przeprowadzonej prognozy wzrostu wytrzymałości na ścinanie przed kolejnym etapem obciążenia. Wartości wytrzymałości na ścinanie dla poszczególnych stref obli-



RYSUNEK 3. Strefy podłoża o różnym mechanizmie zniszczenia po zakończeniu II etapu nasypu w Antoninach: TC – badanie trójosiowe przy ściskaniu, TE – badanie trójosiowe przy wydłużaniu, DSS – badanie prostego ścinania

FIGURE 3. Zones in subsoil with different failure mechanism after finishing II stage of embankment in Antoniny: TC – triaxial compression test, TE – triaxial extension test, DSS – direct simple shear test

zeniowych wyznaczono na podstawie zależności (Lechowicz 1992):

$$\tau_{fu} = K_s \cdot \sigma'_v \quad (1)$$

gdzie:

$K_s$  – współczynnik wzrostu wytrzymałości na ścinanie,

$\sigma'_v$  – składowa pionowa naprężenia efektywnego.

Współczynnik wzrostu wytrzymałości na ścinanie ( $K_s$ ) obliczany jest z zależności:

$$K_s = S \cdot (VSL)^{m_{oc}} \quad \text{dla } VSL > 1 \quad (2)$$

$$K_s = S \cdot (VSL)^{m_{nc}} \quad \text{dla } VSL \leq 1 \quad (3)$$

gdzie:

$VSL$  – wskaźnik stanu składowej pionowej naprężenia efektywnego,

$S$  – znormalizowana wytrzymałość na ścinanie gruntu normalnie konsolidowanego przy  $VSL = 1$ ,

$m_{oc}$  – współczynnik liczbowy, wyrażający nachylenie zależności  $\log \left( \frac{\tau_{fu}}{\sigma'_v} \right)$  od  $\log (VSL)$  w zakresie prekonsolidowanym ( $VSL > 1$ ),

$m_{nc}$  – współczynnik liczbowy, wyrażający nachylenie zależności  $\log \left( \frac{\tau_{fu}}{\sigma'_v} \right)$  od  $\log (VSL)$  w zakresie normalnie konsolidowanym ( $VSL \leq 1$ ).

Wartości parametrów wzrostu wytrzymałości na ścinanie  $S, m_{oc}, m_{nc}$  (tab. 1) dla podłoża organicznego pod nasypem doświadczalnym w Antoninach wyznaczono na podstawie badań przeprowadzonych przez Katedrę Geoinżynierii

TABELA 1. Parametry wzrostu wytrzymałości na ścinanie torfu i gytii (Lechowicz 1992)

TABLE 1. Parameters of increase in shear strength of peat and gyttja (Lechowicz 1992)

Rodzaj badania Research	Rodzaj gruntu Soil	S	$VSL > 1$	$VSL \leq 1$
			$m_{oc}$	$m_{nc}$
Badanie trójosiowe Triaxial test	torf/peat	0,50	0,80	0,15
	gytia/gyttja	0,45		
Badanie prostego ścinania Direct simple shear test	torf/peat	0,40	0,75	0,10
	gytia/gyttja	0,35		

SGGW w Warszawie. Z kolei współczynniki wzrostu wytrzymałości na ścinanie zostały dobrane na podstawie wydzielonych stref, charakteryzujących się różnymi mechanizmami zniszczenia struktury gruntu. Dla porównania otrzymanych wyników wykonano również obliczenia, przyjmując dla całej warstwy geotechnicznej jeden mechanizm zniszczenia.

### Analiza stateczności

Obliczenia współczynnika stateczności ( $F$ ) wykonane na podstawie przeprowadzonej prognozy wzrostu wytrzymałości na ścinanie potwierdziły, iż nasyp doświadczalny w Antoninach jest konstrukcją stateczną w analizowanych etapach budowy.

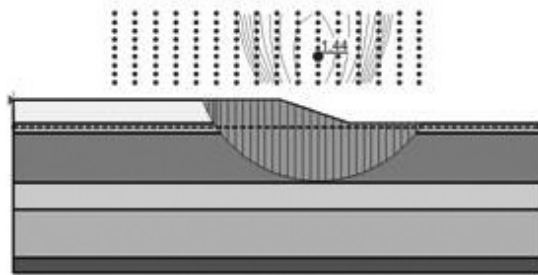
Ocena stateczności nasypu w Antoninach została przeprowadzona z wykorzystaniem programu obliczeniowego *GeoSlope* i metody równowagi granicznej. Współczynnik stateczności ( $F$ ) wyznaczono metodami szwedzką i uproszczoną Bishopa, które zakładają walcową powierzchnię poślizgu, oraz metodą Morgensterna-Price'a, która umożliwia przyjęcie dowolnej powierzchni poślizgu. Obliczenia wykonano dla nasypu podwyższonego w I etapie budowy do wysokości 1,2 m i dodatkowo 1,7 m oraz w III etapie budowy do wysokości 3,9 m. W celu zdefiniowania wytrzymałości na ścinanie zastosowano kryterium wytrzymałościowe Coulomba-Mohra, w którym przyjmuje się liniową zależność między działającą w płaszczyźnie zniszczenia składową styczną granicznego naprężenia a jego składową normalną. Analizę stateczności przeprowadzono w naprę-

żeniach całkowitych, stosując założenie, że w przypadku gruntów organicznych, czyli słabo przepuszczalnych całkowicie nasyconych, kąt tarcia wewnętrznego  $\varphi_u = 0$ , a właściwości wytrzymałościowe podłoża charakteryzuje wytrzymałość na ścinanie bez odplywu ( $\tau_{fu}$ ).

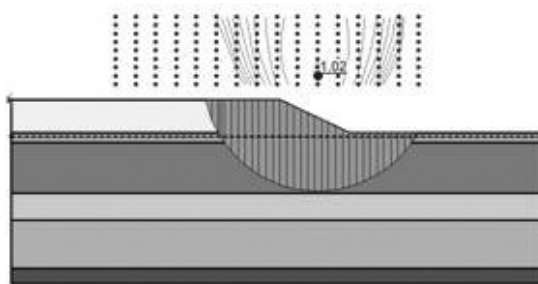
Parametry geotechniczne wykorzystane w obliczeniach dla poszczególnych warstw podłoża oraz nasypu zostały wyznaczone na podstawie badań laboratoryjnych przeprowadzonych przez Katedrę Geoinżynierii SGGW w Warszawie oraz Szwedzki Instytut Geotechniczny (Wrześniński i Lechowicz 2012).

Obliczenia stateczności dla I etapu przeprowadzono dla wysokości 1,2 m (rys. 4), czyli odpowiadającej rzeczywistej warstwie wykonanej w terenie. Wyniki wykazały, iż na tym etapie budowla jest konstrukcją stateczną i można było wznieść wyższy nasyp. W związku z tym przeprowadzono dalsze obliczenia, które wykazały iż w I etapie nasyp można było bezpiecznie wykonać do wysokości 1,7 m (rys. 5). Ze względu na to, iż nasyp wykonany był bezpośrednio na podłożu organicznym, bez wcześniejszego wzmocnienia, nie przeprowadzono prognozy zmiany wytrzymałości na ścinanie, przyjmując w obliczeniach wartości wytrzymałości na ścinanie pomierzone w terenie, skorygowane według zaleceń Szwedzkiego Instytutu Geotechnicznego (Bąkowski 2003).

Analizę stateczności dla III etapu przeprowadzono z wykorzystaniem prognozy zmiany wytrzymałości na ścinanie podłoża spowodowanej obciążeniem nasypem w I i II etapie budowy. Prognozę wzrostu wytrzymałości na ścinanie przeprowadzono na podstawie wydzielonych w podłożu pionowych stref



RYSUNEK 4. Obliczenia stateczności uproszczoną metodą Bishopa dla I etapu budowy nasypu o wysokości 1,2 m  
 FIGURE 4. Calculation of stability with the use of Bishop's method for I stage of embankment with a height of 1.2 m



RYSUNEK 5. Obliczenia stateczności uproszczoną metodą Bishopa dla I etapu budowy nasypu o wysokości 1,7 m  
 FIGURE 5. Calculation of stability with the use of Bishop's method for I stage of embankment with a height of 1.7 m

o różnym mechanizmie zniszczenia, które wykorzystano w doborze wartości parametrów wzrostu wytrzymałości na ścinanie –  $S$ ,  $m_{oc}$  i  $m_{nc}$  (tab. 1). Wykorzystany w obliczeniach wzrost wytrzymałości na ścinanie podział podłoża organicznego przedstawiono na rysunku 3. Wyniki obliczeń wzrostu wytrzymałości na ścinanie w poszczególnych strefach podłoża organicznego w Antoninach przed obciążeniem wywołanym budową III etapu nasypu zestawiono w tabeli 2.

Wartość współczynnika stateczności, wyznaczonego metodą uproszczoną Bishopa dla podłoża podzielonego na strefy o różnym mechanizmie zniszczenia, wynosi 1,22 (rys. 6). W przypad-

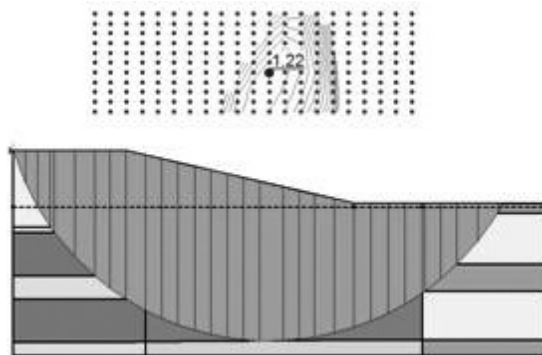
ku zastosowania jednego mechanizmu zniszczenia dla całego podłoża uzyskane współczynniki stateczności znacząco odbiegają od tej wartości. Przyjmując mechanizm zniszczenia obserwowany w badaniu trójosiowym przy ściskaniu (TC), stwierdzono, że współczynnik stateczności wyznaczony tą samą metodą wynosi 1,42 (rys. 7), z kolei w przypadku przyjęcia dla całego podłoża mechanizmu zniszczenia obserwowanego w badaniu prostego ścinania (DSS) wynosi on 1,09 (rys. 8).

Wyniki obliczeń współczynnika stateczności dla I i III etapu zestawiono w tabeli 3.

TABELA 2. Zestawienie wyników obliczeń wzrostu wytrzymałości na ścinanie podłoża organicznego w Antoninach przed obciążeniem wywołanym budową III etapu

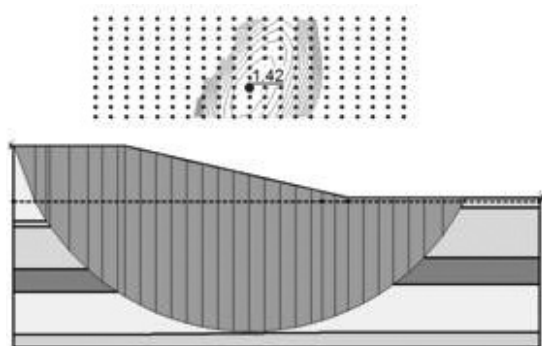
TABLE 2. Summary of calculation results of increase in shear strength of organic subsoil before construction of III stage of embankment in the Antony site

Warstwa Layer	Etap Stage	$\sigma'_{\rho}$ [kPa]	TC			DSS			TE		
			$\sigma'_{\nu}$ [kPa]	$K_s$ [-]	$\tau_{fi}$ [kPa]	$\sigma'_{\nu}$ [kPa]	$K_s$ [-]	$\tau_{fi}$ [kPa]	$\sigma'_{\nu}$ [kPa]	$K_s$ [-]	$\tau_{fi}$ [kPa]
Torf Peat	I	20	44,16	0,41	18,29	37,97	0,35	13,45	30,91	0,45	13,91
	II	15	40,94	0,40	16,39	31,86	0,34	10,83	26,78	0,43	11,47
Gytia Gytja	I	25	36,55	0,42	15,35	28,98	0,35	10,14	21,27	0,48	10,32
	II	20	30,82	0,39	12,02	24,84	0,33	8,20	21,96	0,40	8,80
	III	23	36,29	0,40	14,64	29,14	0,34	9,91	25,34	0,42	10,75



RYSUNEK 6. Obliczenia stateczności uproszczoną metodą Bishopa dla III etapu nasypu z podziałem na strefy podłoża o różnym mechanizmie zniszczenia

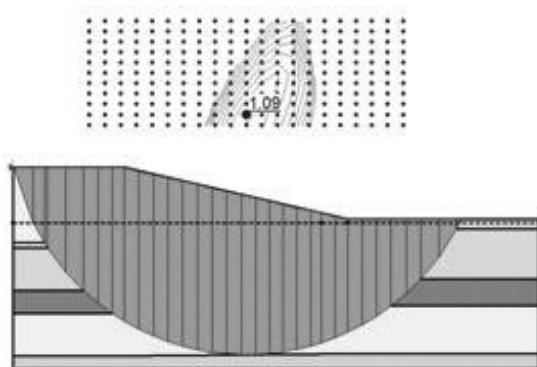
FIGURE 6. Calculation of stability with the use of Bishop's method for III stage of embankment with different failure mechanism in subsoil



RYSUNEK 7. Obliczenia stateczności uproszczoną metodą Bishopa dla III etapu nasypu z jednym mechanizmem zniszczenia podłoża – badanie trójosiowego ściskania (TC)

FIGURE 7. Calculation of stability with the use of Bishop's method for III stage of embankment with one failure mechanism in subsoil – triaxial compression test (TC)





RYSUNEK 8. Obliczenia stateczności uproszczoną metodą Bishopa dla III etapu nasypu z jednym mechanizmem zniszczenia podłoża – badanie prostego ścinania (DSS)  
 FIGURE 8. Calculation of stability with the use of Bishop's method for III stage of embankment with one failure mechanism in subsoil – direct simple shear test (DSS)

TABELA 3. Zestawienie wyników obliczeń stateczności dla I i III etapu budowy w Antoninach  
 TABLE 3. Summary of calculation results of stability for I and III stages of embankment construction in the Antoniny site

Metoda obliczeń Calculation method	I etap I stage		III etap / III stage			
			Różne mechanizmy zniszczenia Different failure mechanism	Jeden mechanizm zniszczenia One failure mechanism		
	1,2 m	1,7 m			TC	DSS
Szwedzka Swedish	1,38	0,96	1,12	1,30	1,00	1,01
Bishopa Bishop	1,44	1,02	1,22	1,42	1,09	1,11
Morgensterna-Price'a Morgenstern-Price	1,44	1,02	1,22	1,41	1,09	1,11

Znaczne różnice w uzyskanych wynikach obliczeń pochodzą z przyjmowania różnych mechanizmów zniszczenia struktury gruntu. Potwierdza to fakt, iż prowadząc analizę stateczności, konieczne jest wcześniejsze wyznaczenie kierunków naprężeń głównych w podłożu wynikających z historii jego obciążenia, co pozwala na przyjęcie odpowiednich mechanizmów zniszczenia.

## Podsumowanie i wnioski

W artykule przedstawiono analizę stateczności etapowo budowanego nasypu na podłożu organicznym z wykorzystaniem prognozy wzrostu wytrzymałości na ścinanie.

Wyniki obliczeń wskazują, że w procesie konsolidacji początkowo mała wytrzymałość podłoża może znacznie

się zwiększyć. Warunkiem jest właściwy dobór wartości i przebiegu przykładowego obciążenia, zapewniający stateczność konsolidowanego podłoża w danej fazie budowy. Przebieg wzmocnienia nie jest równomierny pod całym nasypem i jest uzależniony od kierunków naprężeń głównych, a tym samym od mechanizmu zniszczenia występującego w podłożu. Największy wzrost wytrzymałości na ścinanie podłoża obserwuje się w rejonie, gdzie mechanizm zniszczenia zbliżony jest do obserwowanego w aparacie trójosiowym przy ściskaniu (czyli  $\alpha = 0^\circ$ ), najmniejszy zaś – do obserwowanego w aparacie prostego ścinania (czyli  $\alpha = 45^\circ$ ).

Przeprowadzone obliczenia wykazują, iż prawidłowe oszacowanie współczynnika stateczności wznoszonego nasypu na podłożu słabonośnym uzależnione jest od wyznaczenia kątów obrotu kierunków naprężeń głównych zachodzących w podłożu, czyli od zasięgu mechanizmów zniszczenia struktury gruntu. Przyjmowanie więc, jako reprezentatywnej, wartości wytrzymałości na ścinanie bez odpływu, uzyskanej przy wybranej ścieżce obciążenia, nie jest do końca poprawne i może doprowadzić do przeszacowania lub niedoszacowania wartości współczynnika stateczności.

## Literatura

- BAKOWSKI J. 2003: Analiza stateczności nasypu na podłożu organicznym. Rozprawa doktorska. SGGW, Warszawa.
- HARTLEN J., WOLSKI W. 1996: Embankments on organic soils. Elsevier, Amsterdam.
- LECHOWICZ Z. 1992: Ocena wzmocnienia gruntów organicznych obciążonych nasypem. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- LECHOWICZ Z., SZYMAŃSKI A. 2002a: Odkształcenia i stateczność nasypów na gruntach organicznych. Cz. I. Metodyka badań. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- LECHOWICZ Z., SZYMAŃSKI A. 2002b: Odkształcenia i stateczność nasypów na gruntach organicznych. Cz. II. Metodyka obliczeń. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- SZYMAŃSKI A. 1991: Czynniki warunkujące analizę odkształcenia gruntów organicznych obciążonych nasypem. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- WOLSKI W. et al. 1988: Two-Stage Constructed Embankments on Organic Soils. Swedish Geotechnical Institute. Report 32, Linköping.
- WRZESIŃSKI G., LECHOWICZ Z. 2012: Analiza zachowania się podłoża organicznego obciążonego etapowo budowanym nasypem. *Inżynieria Morska i Geotechnika* 4: 487–491.
- ZDRAVKOVIĆ L., POTTS D.M., HIGHT D.W. 2002: The effect of strength anisotropy on the behavior of embankments on soft ground. *Geotechnique* 52, 6: 447–457.

## Streszczenie

**Ocena stateczności etapowo budowanego nasypu na podłożu organicznym.** Artykuł dotyczy analizy stateczności etapowo wznoszonego nasypu na podłożu organicznym na przykładzie obiektu doświadczalnego w Antoninach. W artykule zostały przedstawione wyniki obliczeń stateczności nasypu w pierwszym i trzecim etapie budowy. Analizę stateczności przeprowadzono na podstawie prognozy wzrostu wytrzymałości na ścinanie, bez odpływu, w wydzielonych strefach podłoża o różnym mechanizmie zniszczenia. Dla porównania otrzymanych wyników wykonano również obliczenia, przyjmując dla całego podłoża jeden mechanizm zniszczenia.

## Summary

### **Stability assessment of stage-constructed embankment on organic subsoil.**

This paper presents the stability analysis of stage-constructed embankment on soft organic subsoil in the Antoniny site. Calculations were carried out with the use of prediction of increase in undrained shear strength in determined zones with different failure mechanisms in subsoil. The stability analysis was made for first and third stages of embankment construction using limit equilibrium method.

### **Authors' address:**

Grzegorz Wrzeński, Zbigniew Lechowicz  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
Katedra Geoinżynierii  
ul. Nowoursynowska 159, 02-787 Warszawa  
Poland  
e-mail: grzegorz\_wrzesinski@sggw.pl  
zbigniew\_lechowicz@sggw.pl