

## **OCENA STATECZNOŚCI NASYPU NA PODŁOŻU ORGANICZNYM Z WYKORZYSTANIEM BADAŃ DMT**

Paweł Galas

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono obliczenia stateczności ogólnej zapory głównej zbiornika Nielisz, który ze względu na zalegające grunty organiczne wykonany został w dwóch etapach. Obliczenia stateczności wykonano dla poszczególnych etapów budowy nasypu, bazując na wynikach badań przeprowadzonych przez Katedrę Geoinżynierii oraz metodach analizy równowagi granicznej. Szczególną uwagę zwrócono na sposób wyznaczenia wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odpływu na podstawie badań dylatometrycznych oraz zastosowanie badań DMT do obliczeń stateczności ogólnej.

**Słowa kluczowe:** współczynnik stateczności, badania dylatometryczne, grunty organiczne, budowa etapowa nasypu

### **WSTĘP**

Racjonalne posadowienie budowli inżynierskiej w przypadku występowania trudnych warunków geotechnicznych może zadecydować o powodzeniu inwestycji. Ekonomiczne oraz bezpieczne rozwiązanie często wymaga zaangażowania specjalistycznych robót geotechnicznych, a budowle ziemne są szczególnie predysponowane do wykorzystania technik wzmocnienia podłoża. W praktyce wykorzystywane są w szerokim zakresie metody modyfikujące powierzchniowo lub włącznie właściwości podłoża [Kłosiński 2007]. Wybór odpowiedniej metody oraz technologii uzależniony jest jednak od właściwości fizyko-mechanicznych podłoża, miąższości gruntów słabonośnych, głębokości zalegania, rodzaju i przeznaczenia nasypu, możliwości wykonawczych, spodziewanych efektów wzmocnienia oraz czasu i kosztu realizacji.

Ocena stateczności nasypów na słabonośnym podłożu jest zagadnieniem, które wymaga szczególnie wnikliwej analizy warunków geotechnicznych oraz rzetelnych badań geotechnicznych. Podczas projektowania posadowienia nasypu na podłożu silnie odkształcalnym należy mieć na uwadze, iż w każdym etapie prowadzonych robót ziem-

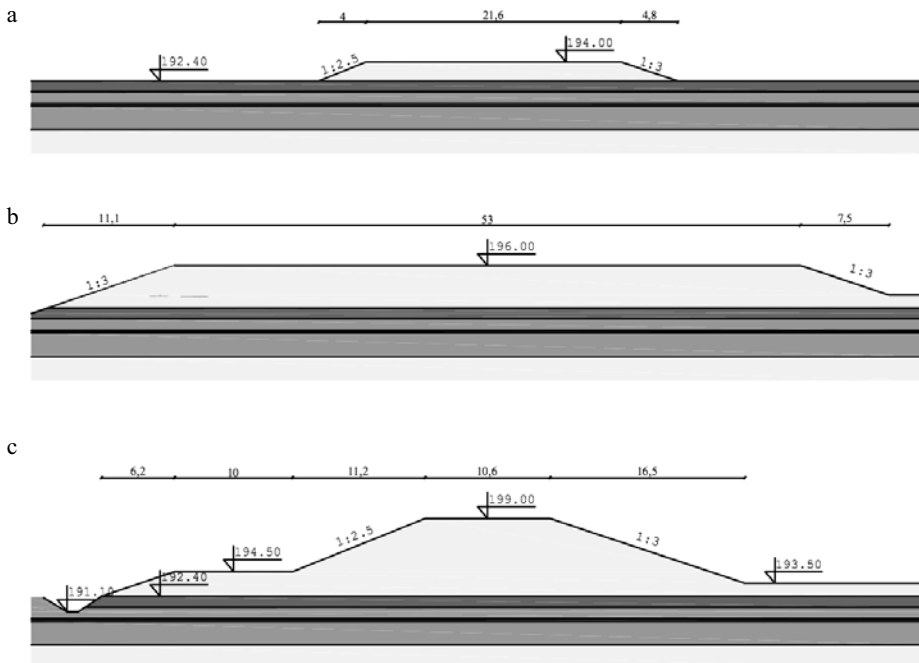
nych musi być zapewniona stateczność konstrukcji. W przypadku zalegania gruntów o bardzo małej wytrzymałości na ścinanie może zająć konieczność budowy nasypu w kilku etapach. Etapowa realizacja budowli nieodzownie związana będzie ze zmianą geometrii podłoża, warunków odpływu oraz właściwości mechanicznych gruntu. Każdemu etapowi powinno towarzyszyć ustalenie miąższości poszczególnych warstw nasypu oraz prognoza wzrostu wytrzymałości podłoża gruntowego obciążonego etapem poprzednim.

Pełna analiza stateczności, uwzględniająca wymienione czynniki, wymaga łącznego rozpatrywania stanu naprężenia oraz odkształcenia, co nie jest możliwe w przypadku zastosowania metod opartych na analizie równowagi granicznej. Jednak w celu ekonomicznego i bezpiecznego projektowania należy przeprowadzać obliczenia poszczególnych etapów z uwzględnieniem zmian wytrzymałości na ścinanie podłoża podczas realizacji nasypu. W artykule przedstawiono, w jaki sposób można przeprowadzić inżynierską analizę przypadku budowlanego stateczności nasypu z wykorzystaniem badań dylatometrycznych DMT.

## CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU

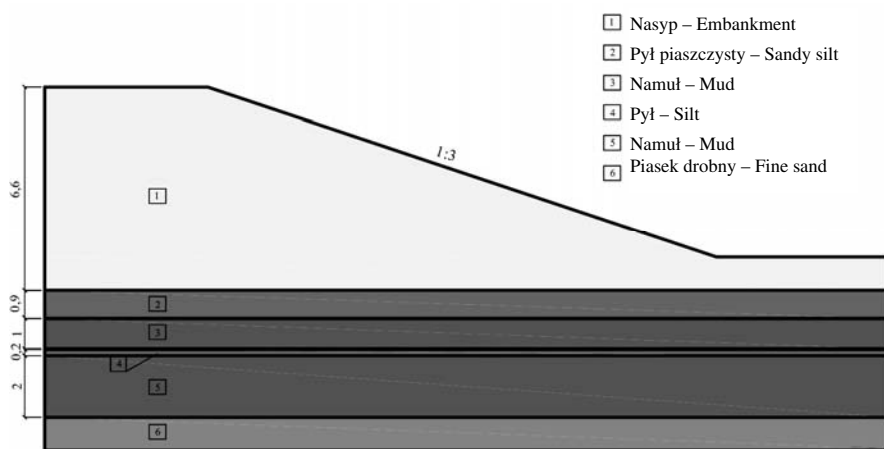
Zbiornik wodny Nielisz wraz z zaporą czołową znajduje się w Kotlinie Zamojskiej, w północnej części Wyżyny Lubelskiej. Roboty budowlane przewidywały znaczną rozbudowę w dwóch etapach korpusu zapory ponad istniejący nasyp grobli. Pierwszy etap polegał na częściowym rozebraniu istniejącego nasypu i dobudowaniu nasypów dociążających do rzędnej 196,00 m n.p.m. W drugim etapie nasypy dociążające zostały rozebrane, a korona nasypu podniesiona do rzędnej 199,00 m n.p.m. (rys. 1). Ze względu na zaleganie gruntów organicznych zdecydowano o konieczności wzmocnienia podłoża. W omawianym przypadku wybrano czasowe przeciążenie podłoża nasypu, pozwalające na wywołanie w sposób stosunkowo szybki znacznej części spodziewanych osiadań podłoża.

Reprezentatywny przekrój geotechniczny (hm 4+50) oraz schemat docelowy przypadku budowlanego skarpy odwodnej przedstawiono na rysunku 2. Bezpośrednio poniżej pierwotnego poziomu terenu do głębokości około 0,9 m p.p.t. zalegały miękkoplastyczne pyły, pyły piaszczyste. Warstwa pyłów zalegała na namule organicznym podzielonym na dwie części cienką warstwą pyłu. Badania edometryczne przeprowadzone przez Katedrę Geoinżynierii pozwoliły na wyznaczenie naprężenia prekonsolidacji. Badania wykazały, iż współczynnik prekonsolidacji dla najsłabszych warstw podłoża wynosił  $OCR = 2-3$ , a przyrost składowej pionowej naprężenia efektywnego wywołany budową nasypu spowoduje znaczne przekroczenie początkowej wartości naprężenia prekonsolidacji [Lechowicz i in. 1996]. Podstawowe właściwości fizyczne przedstawiono w tabeli 1.



Rys. 1. Etapy budowy nasypu zapory czołowej Nielisz

Fig. 1. Embankment construction stages of Nielisz reservoir



Rys. 2. Schemat skarpy odwodnej zapory czołowej Nielisz

Fig. 2. Scheme of Nielisz reservoir downstream slope

Tabela 1. Właściwości fizyczne podłoża zapory czołowej zbiornika Nielisz  
 Table 1. Physical properties of soft soils deposited under main dam of Nielisz reservoir

Rodzaj gruntu Type of soil	Wilgotność naturalna Water content	Granice konsystencji Consistency limits		Ciężar objętościowy Unit weight	Zawartość części organicznych Organic matter content
	$w_n$ [%]	$w_p$ [%]	$w_L$ [%]	$\gamma$ [kN·m <sup>-3</sup> ]	$I_{om}$ [%]
Pył piaszczysty Sandy silt	30–35	18–20	30–32	18,5	2–3
Namuł Mud	110–130	45–55	130–150	13	20–22
Pył Silt	35–38	20–22	40–42	18,5	2–3
Namuł Mud	105–120	40–45	110–130	13,5	18–20

Badania dylatometryczne przeprowadzono na obiekcie Nielisz w dwóch seriach. Pierwszą serię wykonano w 1994 roku w ramach weryfikacji istniejącej dokumentacji geologiczno-inżynierskiej. Badania przeprowadzone zostały w kilku przekrojach, przy czym każdy przekrój posiadał dwa profile u podnóża istniejącego nasypu oraz jeden w osi korony. Drugą serię badań wykonano pod koniec etapu I budowy w kwietniu 1995 roku.

### WYZNACZANIE WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCINANIE W WARUNKACH BEZ ODPLYWU ( $\tau_{fu}$ ) Z BADAŃ DYLATOMETRYCZNYCH

W celu wyznaczenia wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odpływu na podstawie badań dylatometrycznych najczęściej wykorzystuje się zależność (2), wynikającą z relacji między znormalizowaną wytrzymałością na ścinanie dla gruntów normalnie konsolidowanych a współczynnikiem prekonsolidacji  $OCR$  (1):

$$(\tau_{fu} / \sigma'_{vo})_{OC} = (\tau_{fu} / \sigma'_{vo})_{NC} \cdot (OCR)^m \quad (1)$$

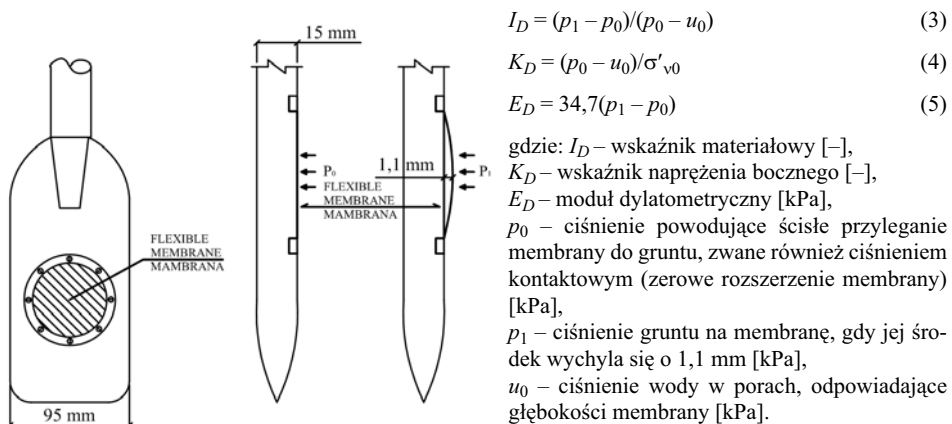
$$\tau_{fu} = 0,22\sigma'_{vo} (0,5K_D)^{1,56} \quad (2)$$

gdzie:  $\tau_{fu}$  – wytrzymałość na ścinanie w warunkach bez odpływu [kPa],  
 $\sigma'_{vo}$  – składowa pionowa naprężenia geostatycznego efektywnego [kPa],  
 $K_D$  – wskaźnik poziomej składowej naprężenia [–],  
 $OCR$  – współczynnik prekonsolidacji [–].

Na podstawie przeprowadzonych badań dylatometrycznych oraz laboratoryjnych [Marchetti 1980] ustalono relację między współczynnikiem prekonsolidacji i wskaźnikiem naprężenia bocznego oraz przyjęto  $(\tau_{fu}/\sigma'_{vo})_{NC} = 0,22$  [Mesri 1975],  $m = 0,8$  [Ladd 1991]. Parametry geotechniczne wyznaczone na podstawie zależności empirycznych mogą być jednak obarczone znacznym błędem. Oryginalne zależności podane przez Marchettiego odnoszą się do ograniczonej liczby badań laboratoryjnych gruntów niescemen-towanych, które nie poddane zostały w swojej historii złożonym procesom obciążania i odciążania.

Określenie wiarygodnej wartości *OCR* w podłożach, w których zjawisko prekonsolidacji jest wynikiem procesów mechanicznych i/lub procesów fizykochemicznych, starzenia się, wysychania itp., należy uznać za trudne. Ponadto wytrzymałość na ścinanie w warunkach bez odpływu gruntów normalnie konsolidowanych zależy m.in. od wartości wskaźnika plastyczności oraz typu badania. Zatem wartość wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odpływu nie jest wartością „unikalną”, a ściśle związaną ze stanem naprężenia oraz przeprowadzonym badaniem, na przykład badaniem trójosiowym ze ścisaniem (TC), badaniem prostego ścinania (DSS), badaniem trójosiowym z wydłużaniem (TE).

Nie sposób jednak nie docenić efektywności i stosunkowo dużej prostoty badań dylatometrycznych (rys. 3). Dla konstrukcji niosących ze sobą duże zagrożenie życia i mienia sondowania powinny być wykonywane razem z badaniami laboratoryjnymi, które potwierdzą lub wykluczą istniejące zależności wykorzystywane do wyznaczania parametrów geotechnicznych. W przypadku zapory Nielisz wykorzystano zmodyfikowaną wersję zależności (1). Jako badania referencyjne potraktowano wyniki wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odpływu wyznaczone połową sondą krzyżkową na terenie obiektu oraz wcześniejsze doświadczenia Katedry Geoinżynierii SGGW. Wyniki analiz wykazały, iż dla namułu organicznego należy przyjmować znormalizowaną wytrzymałość na ścinanie w warunkach bez odpływu dla gruntów normalnie konsolidowanych w granicach  $(\tau_{fu}/\sigma'_{vo})_{NC} = 0,35-0,40$  (Lechowicz i Bąkowski 1997).

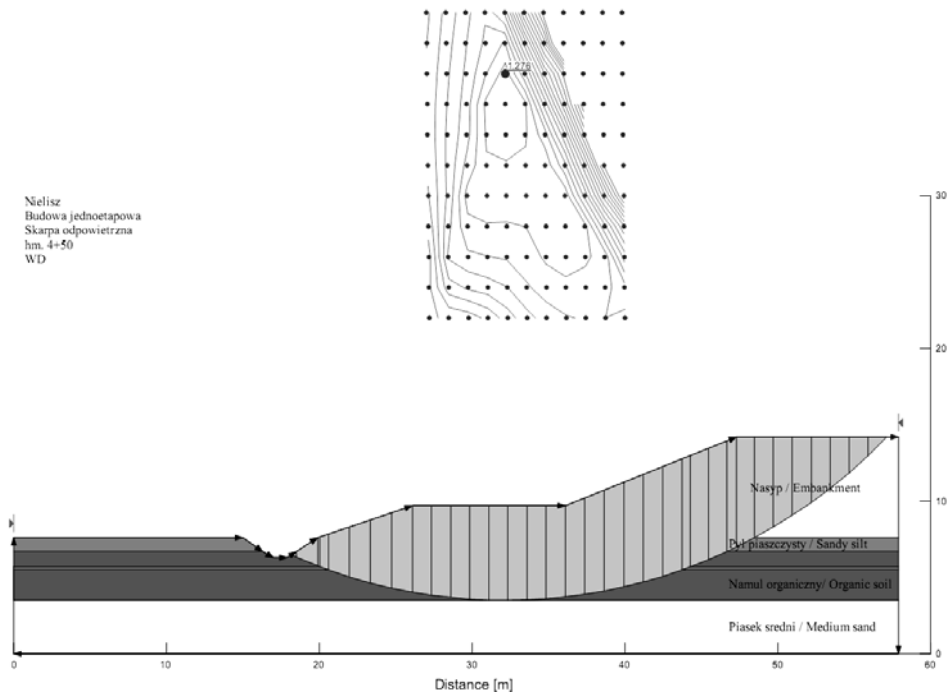


Rys. 3. Schemat łopatki dylatometrycznej oraz definicja wskaźników dylatometrycznych  
 Fig. 3. Scheme of dilatometer blade and dilatometer indices definition

## WYNIKI OBLICZEŃ

Obliczenia stateczności przeprowadzono, wykorzystując metody oparte na analizie równowagi granicznej, zakładając, iż zniszczenie podłoża następuje na skutek poślizgu sztywnej bryły gruntu po określonej powierzchni. Analizę wykonano w warunkach naprężeń całkowitych, przyjmując, iż budowie każdego z etapów towarzyszą warunki bez odpływu. Jednocześnie uwzględniono dla drugiego etapu wzrost wytrzymałości na ścinanie, wynikający ze zmiany stanu naprężenia w podłożu po wykonaniu etapu pierwszego.

W pierwszym kroku przeanalizowano możliwość wykonania nasypu w jednym etapie (rys. 4). Obliczenia stateczności wykonano przy uwzględnieniu początkowej wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odpływu, wyznaczonej na podstawie badań dylatometrycznych. Przeprowadzone badania wykazały, iż średnie wartości wytrzymałości na ścinanie dla najsłabszych warstw mieszczą się w przedziale 15–20 kPa w przypadku górnej warstwy namułu oraz 20–25 kPa dla warstwy dolnej (rys. 5). Przyjęte do analizy wartości parametrów geotechnicznych przedstawiono w tabeli 2. Obliczenia wskazują, iż wartości współczynnika stateczności w zależności od przyjętej metody obliczeniowej wahają się w granicach 1,17–1,39 (tab. 2), nie zapewniając odpowiedniego zapasu bezpieczeństwa według Rozporządzenia... [2007].



Rys. 4. Obliczenia współczynnika stateczności metodą Bishopa w warunkach bez odpływu (budowa jednoetapowa)

Fig. 4. Safety factor calculations using Bishop's method under undrained condition (1-staged embankment)

Tabela 2. Wyniki obliczeń współczynnika stateczności dla przypadku budowy jednoetapowej  
Table 2. Results of safety factors for embankment constructed in one stage

Etap Construction phase	Współczynnik stateczności Safety factor			
	Skarpa odpowietrzna Upstream slope		Skarpa odwodna Downstream slope	
	metoda szwedzka Swedish method	metoda Bishopa Bishop's method	metoda szwedzka Swedish method	metoda Bishopa Bishop's method
I	1,17	1,39	1,12	1,31

Zachodzi zatem konieczność określenia bezpiecznej wysokości nasypu dla „początkowych” wartości parametrów geotechnicznych oraz przeanalizowanie poszczególnych faz z uwzględnieniem konsolidacyjnego wzmocnienia podłoża. Dla pierwszego etapu przyjęto, zgodnie z rysunkiem 1b, podniesienie korony nasypu do rzędnej 196,00 oraz parametry geotechniczne przedstawione w tabeli 3. Na podstawie obliczeń otrzymano wartość współczynnika stateczności w zakresie 1,58–1,69 dla skarpy odpowietrznej oraz 2,03–2,32 dla skarpy odwodnej (tab. 5).

Tabela 3. Parametry geotechniczne przyjęte do obliczeń stateczności etapu I budowy  
Table 3. Geotechnical parameters used in stability analysis for first construction phase

Lp.	Warstwa geotechniczna Geotechnical layer	$\varphi'$ [°]	$c'$ [kPa]	$\tau_{fu}$ [kPa]	$\gamma$ [kN·m <sup>-3</sup> ]	Warunki odpływu Drainage conditions
1	Nasyp Embankment	33	3	–	19	z odpływem drained
2	Pył piaszczysty Sandy silt	–	–	20	18,5	
3	Namuł Mud	–	–	15	13	bez odpływu undrained
4	Pył Silt	–	–	25	18,5	
5	Namuł Mud	–	–	20	13,5	
6	Piasek drobny/średni Fine/medium sand	34	0	–	19	z odpływem drained

Badania przeprowadzone po okresie około 5 miesięcy od zakończenia etapu I wykazały wyraźny wzrost  $\tau_{fu}$  na skutek konsolidacyjnego wzmocnienia podłoża (rys. 5). Dla tego etapu II przypadku budowlanego (rys. 1c) przeanalizowano, uwzględniając zmianę wytrzymałości na ścinanie, wynikającą z częściowej konsolidacji podłoża. Do wyznaczenia wytrzymałości na ścinanie po zakończeniu etapu I wykorzystano zależność Roque i innych [1988]:

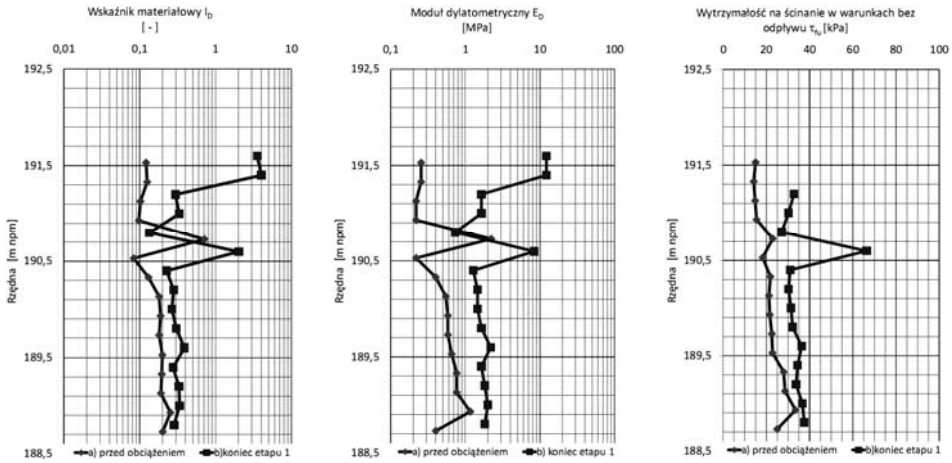
$$\tau_{fu} = \frac{p_1 - \sigma_{ho}}{N_c} \quad (6)$$

gdzie:  $p_1$  – ciśnienie gruntu na membranę, gdy jej środek wychyla się o 1,1 mm [kPa],  
 $\sigma_{ho}$  – składowa pozioma naprężenia całkowitego w warunkach *in situ* [kPa],  
 $N_c$  – współczynnik empiryczny (wg Roque i in.  $N_c = 5-9$ ) [-].

Na podstawie badań połową sondą krzyżakową i weryfikacji równania (3) [Lechowicz i Bąkowski 1997] zaleca się wykorzystywanie dla normalnie konsolidowanych namułów współczynnika  $N_c = 5$ .

Zastosowanie równania (6) wskazuje na przyrost wytrzymałości warstw namułów powyżej 30 kPa.

Przyjęte parametry oraz wyniki obliczeń dla etapu II przedstawiono odpowiednio w tabelach 4 oraz 5. Obliczenia stateczności wykazały wartość współczynnika stateczności dla skarpy odpowietrznej oraz odwodnej w granicach 1,80–1,97.



Rys. 5. Profile wskaźników dylatometrycznych oraz wytrzymałość na ścinanie w warunkach bez odpływu przed rozpoczęciem budowy i po etapie I [Lechowicz i in. 1996]

Fig. 5. Profiles of dilatometer indices and results of undrained shear strength before and after I stage of embankment construction

Tabela 4. Parametry geotechniczne przyjęte do obliczeń stateczności etapu II budowy

Table 4. Geotechnical parameters used in stability analysis for second construction phase

Lp.	Warstwa geotechniczna Geotechnical layer	$\varphi'$ [°]	$c'$ [kPa]	$\tau_{fu}$ [kPa]	$\gamma$ [kN·m <sup>-3</sup> ]	Warunki odpływu Drainage conditions
1	Nasyp Embankment	33	3	–	19	z odpływem drained
2	Pył piaszczysty Sandy silt	–	–	40	18,5	bez odpływu undrained
3	Namuł Mud	–	–	30	13	
4	Pył Silt	–	–	50	18,5	
5	Namuł Mud	–	–	30	13,5	
6	Piasek drobny/średni Fine/medium sand	34	0	–	19	z odpływem drained

Tabela 5. Wyniki obliczeń współczynnika stateczności dla poszczególnych faz budowy

Table 5. Results of safety factors for particular construction phases

Etap Construction phase	Współczynnik stateczności Safety factor			
	Skarpa odpowietrzna Upstream slope		Skarpa odwodna Downstream slope	
	metoda szwedzka Swedish method	metoda Bishopa Bishop's method	metoda szwedzka Swedish method	metoda Bishopa Bishop's method
I	1,58	1,69	2,03	2,32
II	1,80	1,97	1,67	1,89



## PODSUMOWANIE

Wznoszenie nasypu na podłożu o małej wytrzymałości na ścinanie w stosunku do wartości obciążenia przekazywanego przez budowlę predysponuje budowlę etapową jako racjonalne rozwiązanie posadowienia nasypu. W pierwszym kroku obliczenia powinny obejmować analizę posadowienia budowli w jednym etapie z uwzględnieniem początkowej wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odpływu. W przypadku braku możliwości budowy jednoetapowej obliczeniom powinno towarzyszyć ustalenie miąższości warstw poszczególnych etapów oraz prognoza zmian wytrzymałości podłoża.

Wyniki wskazują na przydatność badań dylatometrycznych w prognozowaniu wzrostu wytrzymałości na ścinanie oraz w pracach projektowych, dotyczących oceny stateczności etapowo wznoszonego nasypu. Wytrzymałość na ścinanie w warunkach bez odpływu dla prekonsolidowanych namulów można wyznaczać na podstawie zależności (1) z uwzględnieniem znormalizowanej wytrzymałości na ścinanie  $(\tau_{fu}/\sigma'_{vo})_{NC} = 0,35-0,40$  [Lechowicz i Bąkowski 1997]. Wytrzymałość na ścinanie gruntów normalnie konsolidowanych lepiej opisuje zależność Roque i innych [1988], wymaga jednak poprawnego oszacowania współczynnika  $N_c$ , który dla badanych namulów wynosił 5.

## PIŚMIENNICTWO

- Duncan J.M., Wright S.G., 2005. Soil strength and slope stability. John Wiley & Sons Inc., New Jersey.
- Kłosiński B., 2007. Współczesne sposoby wzmocnienia podłoża i fundamentów budowli. Seminarium IBDiM i PZWFS „Wzmocnianie podłoża gruntowego i fundamentów budowli”, Warszawa.
- Ladd C.C., 1991. Stability evaluation during staged construction. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE 117 (GT4), 540–615.
- Lechowicz Z., Bąkowski J., 1997. Wykorzystanie metody wstępnego przecięcia w posadowieniu nasypu na słabonośnym podłożu. Roczn. AR Poznań CCXCIV, Melior. Inż. Środ. 19, cz. 2, 105–113.
- Lechowicz Z., Rabarijoely S., 1996. Zbiornik Nielisz – badania wzmocnienia słabonośnego podłoża. Konferencja Naukowa „Problemy kształtowania środowiska obszarów wiejskich”, Warszawa, 33–44.
- Lechowicz Z., Mirecki J., Wolski W., 1996. Zbiornik Nielisz – etapowa budowa Zapory. Konferencja Naukowa „Problemy kształtowania środowiska obszarów wiejskich”, Warszawa, 303–314.
- Marchetti S., 1980. In situ tests by flat dilatometer. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 106 (GT3), 299–321.
- Mesri G., 1975. Discussion of New design procedure for stability of soft clays. Journal of the Geotechnical Engineering Division ASCE, 101 (GT4), 409–412.
- PN-86/B-02480 Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów.
- Roque R., Janbo N., Senneset K., 1988. Basic interpretation procedures of flat dilatometer tests. Proc. Int. Sym. on Penetration Testing, Orlando 1, 1, 577–587.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dn. 20 kwietnia 2007 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie. Dz.U. z 2007 r. nr 86, poz. 579.

## USE OF FLAT DILATOMETER TESTS IN SLOPE STABILITY ANALYSIS

**Abstract.** The paper presents slope stability analysis of main dam embankment of Nielisz reservoir. Due to large thickness of organic soils deposited at the construction site and spatial variability of soft soil properties the structure was constructed in two stages with additional preloading fills. This paper presents slope stability analysis based on extensive field and laboratory tests executed before and during embankment construction by Department of Geotechnical Engineering of Warsaw University of Life Sciences. Calculations were carried out for each stage of embankment execution with use of limit equilibrium methods and were restricted only to construction phase of the structure. Special attention was paid to significant effectiveness of flat dilatometer tests in undrained shear strength determination and it's usefulness in slope stability analysis.

**Key words:** safety factor, flat dilatometer test, organic soils, staged embankment

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 22.12.2010