

# Przestrzenne zmienności parametrów wytrzymałościowych gruntów organicznych i ich szacowanie na podstawie sondowań geotechnicznych – przykład zapory w Nieliszu (województwo lubelskie)

Simon Rabarijoely<sup>1</sup>



**The spatial variation of the shear strength parameters of organic soils and their estimation based on in situ tests – a case study of the Nielisz dam (Lublin Voivodeship).** Prz. Geol., 65: 183–192.

*Abstract.* This paper presents the problem of parameter selection in geotechnical engineering design. The statistical methods with a literature review to estimate the characteristic parameter value are described. The literature review includes the description of the geotechnical parameters used for statistical analysis. In addition, the field tests (CPT and DMT) are presented together with the interpretation of the obtained results. The empirical relationships serving to calculate the parameter values were analyzed. Then, the Nielisz embankment was characterized, where the object for which studies were subjected to the CPT and DMT tests. Finally, the selected parameters using the statistical method of classical and bayesian approach were determined.

**Keyword:** CPT, DMT, geotechnical parameters, statistical analysis, geostatistics, kriging, Nielisz

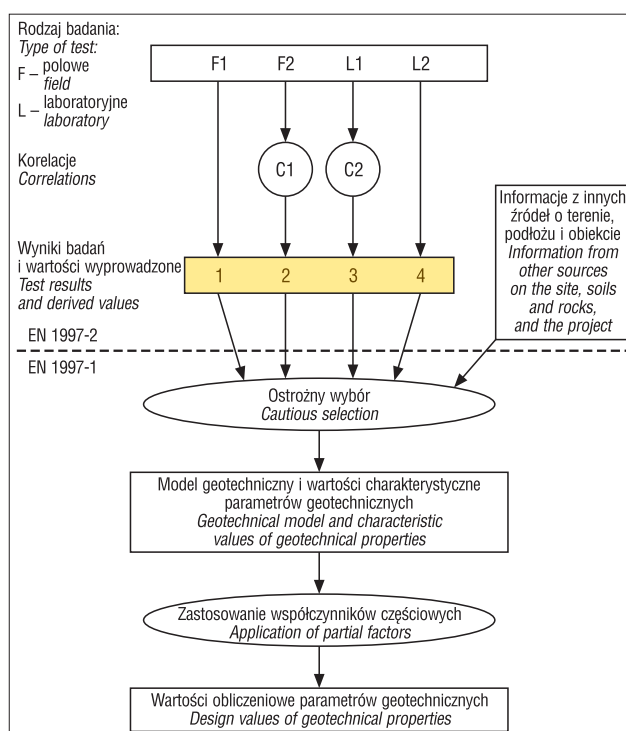
## GeoSym 2016

Podstawowym dokumentem regulującym zasady projektowania budowli geotechnicznych w krajach Unii Europejskiej jest Eurokod 7. Według tego dokumentu jednym z najważniejszych zadań w projektowaniu inżynierskim jest dobór parametrów, na podstawie których określa się stany graniczne. Bardzo ważnym, z punktu widzenia zagadnień inżynierskich, rodzajem gruntów są grunty organiczne. Charakteryzują się one dużą zmiennością parametrów wytrzymałościowych, co często powoduje problemy, np. w posadowieniu obiektów inżynierskich.

Celem artykułu jest przedstawienie wybranych właściwości parametrów gruntów organicznych z zapory w Nieliszu, uzyskanych na podstawie badań laboratoryjnych pobranych próbek gruntu. Dla tego obiektu wykonano sondowania CPT i DMT, co pozwoliło na wydzielenie granic warstw oraz wyznaczenie ich parametrów. Na podstawie tych danych, zgodnie z zaleceniami Eurokodu, przeprowadzono próbę modelowania geostatystycznych parametrów wytrzymałościowych (ryc. 1). Przedstawiono również wyniki analiz zakresu zmienności danego parametru dla konkretnego obiektu. Uzyskane parametry poddano analizie statystycznej z wykorzystaniem metody klasycznej oraz podejścia bayesowskiego. W pracy zawarto także porównanie i interpretację uzyskanych wyników.

### WYZNACZANIA PARAMETRÓW METODAMI STATYSTYCZNYMI I GEOSTATYSTYCZNYMI

Zmienność parametrów gruntowych jest przedmiotem badań wielu naukowców. Phoon i Kulhawy (1999a, b) w celu modelowania tej zmienności podjęli próbę skategoryzowania niepewności pomiarów do różnych gruntów. Podobne badania przeprowadzali też inni badacze (m.in.



**Ryc. 1.** Schemat wyboru wartości wyprowadzonych, charakterystycznych i obliczeniowych parametrów geotechnicznych (PN-EN 1997-1:2008, PN-EN 1997-2:2009)

**Fig. 1.** General framework for the selection of derived values of geotechnical properties (PN-EN 1997-1:2008, PN-EN 1997-2:2009)

Clark, 1979; Asoaka & Grivas, 1982; Orr, 1993; Jaks i in., 1993; Vanmarcke, 1994; Popescu, 1995; Baecher & Christian, 2003. W analizie zmienności przestrzennej właściwości gruntów, a w szczególności ich wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odplywu, niemal wyłącznie wykorzystywano analizę szeregów czasowych i losowej teorii pola (Lumb, 1974; Matsuo & Asaoka, 1977; Vanmarcke, 1977; Asaoka & Grivas, 1982; Li & White, 1987). Alternatywnym

<sup>1</sup> Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa; simon\_rabarijoely@sggw.pl.

rozwiązaniem, zaproponowanym przez Matherona (1965), jest traktowanie populacji próbek jako zbioru danych zmiennych, reprezentowanego przez przypadkowe funkcje, zamiast klasycznego podejścia, które traktuje je jako zmienne losowe. Pozwala to na określenie struktury korelacji pomiędzy parami zmiennych losowych, które zawierają funkcję losową wartości mierzonej. Puła (2014) wynioskował, że niewątpliwie bardzo istotne jest uwzględnienie uśrednienia przestrzennego w obszarze towarzyszącym rozpatrywanemu mechanizmowi zniszczenia. Taką możliwość daje charakteryzowanie właściwości podłoża za pomocą pól losowych. Jednak przedstawiony przykład wykazał, że wówczas charakterystyczne wartości w sposób istotny zależą od wielkości rozpatrywanego obszaru, co utrudnia ich wyznaczenie. Wierzbicki i Młynarek (2015) twierdzili, że przy wykorzystaniu programów komputerowych do interpretacji badań, np.: CPTU, SCPTU, DMT, SDMT powinna być wprowadzona możliwość ingerencji wykwalifikowanego geotechnika. Miałby on możliwość dokonania wyboru grupowanego parametru, metody wyznaczania parametru reprezentatywnego i przyjęcia procedury interpretacyjnej, uwzględniającej tak zwane lokalne zależności korelacyjne. Sondowania CPT/DMT zostały wykonane zgodnie z obowiązującymi procedurami zawartymi w odpowiednich normach geotechnicznych. W celu wyznaczenia parametrów geotechnicznych z sondowań CPT/DMT zastosowano zależności wymienione w literaturze (Marchetti, 1980; Meigh, 1987; Smith & Houlsby, 1995; Lunne i in., 1997; Młynarek i in., 2003; Godlewski i in., 2016). W analizie została też wykorzystana zależność opracowana przez Schmertmanna (1986, 1988). Wytrzymałość na ścinanie bez odpływu  $\tau_{ri}$  wyznaczono przy  $N_k$  równym 12. Wartość  $N_k$  skorelowano z wynikami badań sondą krzyżakową FVT. Natomiast wytrzymałość na ścinanie bez odpływu  $\tau_{ri}$  została wyznaczona z zależności Smitha i Houlsby'ego (1995). W równaniu tym wielkość parametru  $\tau_{ri}$  zależy od pomiaru ciśnienia  $P_0$ , poziomej składowej naprężenia całkowitego  $\sigma_{h0}$  oraz od dylatometrycznego współczynnika nośności  $N_D$ . Do obliczeń prezentowanych w artykule przyjęto  $N_D = 5$ .

W celu przeprowadzeniu analizy statystycznej wyników uzyskanych z sondowania CPT oraz DMT wykorzystano program BAYANAL. Pozwala on na oszacowanie parametrów metodami Bayesa oraz klasyczną. W artykule opisano wnioskowanie wynikające z obu zastosowanych metod (Rabarijoely i in., 2012).

W podejściu bayesowskim pewna wstępna wiedza na temat rozkładu wartości parametrów jest modyfikowana po skonfrontowaniu z danymi. Korzystając z rozkładu *a priori* i wiedzy o pobranej próbce, określa się nowy rozkład parametrów, który uwzględnia zarówno pierwotne przekonania, jak i uzyskane dane empiryczne. Istotną właściwością tej metody jest to, że sekwencyjne modyfikowanie rozkładu badanego parametru daje taki sam rezultat, jak wówczas gdy wszystkie dawki informacji są naraz włączone do wnioskowania, tzn. jeśli pobierane kolejno próby są potraktowane jako jedna większa próba. Z tego też wynika, że kolejność dołączania nowych porcji informacji jest dowolna. Pozostaje odpowiedzieć na pytanie, kiedy podejście bayesowskie warto stosować w praktyce, tzn. kiedy metoda klasyczna nie da lepszych wyników? Podejście klasyczne nie da lepszych wyników, gdy infor-

macje *a priori* są jedynie rezultatami analiz, ale próbki, na podstawie których były one robione, nie są już dostępne (zatem nie da się rozszerzyć danych, na bazie których jest dokonywane wnioskowanie klasycznym sposobem).

Dla zmiennych losowych o ciągłym rozkładzie prawdopodobieństwa twierdzenie Bayesa można przedstawić następująco (Garbulewski i in., 2007):

$$f(\theta|x) = \frac{f(x|\theta) \cdot f(\theta)}{\int_{\Omega} f(x|\theta) \cdot f(\theta) d\theta} \quad [1]$$

gdzie:

$f(\theta)$  – funkcja gęstości prawdopodobieństwa *a priori* parametru  $\theta$ ,

$f(x|\theta)$  – funkcja wiarygodności, czyli funkcja gęstości warunkowego wyniku obserwacji przy danej wartości  $\theta$ ,  
 $\Omega$  – oznacza zbiór możliwych wartości szacowanego parametru.

Po lewej stronie wzoru znajduje się funkcja gęstości aposteriorycznego prawdopodobieństwa parametru  $\theta$ , po zaobserwowaniu wyniku  $x$  z próby.

Tak więc, na podstawie twierdzenia Bayesa aktualizuje się funkcję gęstości apriorycznego prawdopodobieństwa parametru, przy wykorzystaniu informacji z próbki. Niestety, wyznaczenie aposteriorycznej gęstości prawdopodobieństwa określonego parametru jest, poza niektórymi przypadkami, trudne. Na szczęście nie dotyczy to rozkładów normalnych, które często występują w praktyce. Przedstawione twierdzenie Bayesa daje bardzo cenną w praktyce możliwość sekwencyjnego włączania nowych informacji, pochodzących z kolejno pobieranych prób losowych, do wnioskowania na temat parametru. Wiedzę na temat aposteriorycznego prawdopodobieństwa parametru  $\theta$  traktuje się na kolejnym etapie jako aprioryczne prawdopodobieństwa tego parametru. W związku z tym podejście bayesowskie jest często nazywane procesem uczenia.

Częstym przypadkiem jest szacowanie nieznanego parametru  $\theta$ , będącym średnią w populacji normalnej, dla której jest znane odchylenie standardowe  $\sigma_0$ . Jeśli skorzysta się z wiedzy *a priori* odnośnie średniej  $\theta$  tej populacji, z której wynika, że  $\theta$  jest zmienną losową o rozkładzie normalnym z parametrami  $m_1$  i  $\sigma_1$ , natomiast średnia z wylosowanej  $n$ -elementowej próby wynosi  $m_2$ , to aposterioryczny rozkład zmiennej losowej  $\theta$  jest też normalny, o średniej  $m$  i odchyleniu standardowym  $\sigma$  obliczonym następująco:

$$m = \frac{(1/\sigma_1^2) \cdot m_1 + (n/\sigma_0^2) \cdot m_2}{(1/\sigma_1^2) + (n/\sigma_0^2)} \quad [2]$$

$$\sigma = \frac{1}{(1/\sigma_1^2) + (n/\sigma_0^2)} \quad [3]$$

## ZASTOSOWANIE RÓŻNYCH METOD GEOSTATYSTYCZNYCH

Tradycyjne sposoby interpretacji danych CPT są określone metodami deterministycznymi, które zostały uzyskane z empirycznych, statystycznych lub analitycznych modeli, skalibrowanych z bazami danych zawierającymi specyficzne informacje geologiczne. Grupowanie statystyczne

zostało wykorzystane do wyznaczenia stratygrafii warstw gruntu i identyfikacji w sposób obiektywny odczytów CPTU (Everitt, 1974; Hegazy & Mayne, 2002; Liao & Mayne, 2007).

Młynarek i inni (2005, 2007) stwierdzili, że do efektywnego i poprawnego wydzielenia warstw geotechnicznych można zastosować dwa kryteria Młynarka i Wierzbickiego oraz Calińskiego i Harabasza. Metoda opiera się na kącie cosinus i umożliwia wykrywanie dodatkowej grupy warstw. Metoda analizy klastra ułatwia obiektywną, jakościową analizę ilościowych profili badanego podłoża. Dlatego też metody te stanowią bardzo przydatne narzędzie w projektowaniu geotechnicznym. Analiza w przypadku obu metod musi zawierać wnioski sformułowane przez doświadczalnego geotechnika, co świadczy o jego roli w procesie identyfikacji warstwy. Geotechnik powinien zdecydować, który z parametrów ma odgrywać główną rolę w wydzielaniu jednorodnych warstw. Bilski i Rabarijoely (2009) stwierdzili, że krytyczny wybór progów, na podstawie analizy histogramu wyników pomiarów, pomaga w dużym stopniu w intuicyjnym wskazaniu podobieństwa pomiędzy dwoma punktami (profilami podłoża).

Spośród różnych formuł estymacji wykorzystywanych w geostatystyce szczególne znaczenie dla nauki o podłożu gruntowym ma interpolacja krigingu zwyczajnego. Pozwala ona na wykreślenie mapy izolinii, która przedstawia zmienność parametru geotechnicznego na badanym obszarze. W kringingu zwyczajnym, wartość interpolowana ma postać średniej ważonej, zaś informacje dotyczące zmienności badanego parametru wynikają z analizy semiwariogramu (Kraak & Ormeling, 1998; Marmol, 2002; Kokesz, 2010).

Dzięki technice komputerowej i odpowiedniemu oprogramowaniu jest obecnie możliwe szybkie sporządzenie map izolinii z wykorzystaniem interpolacji kringingu za pomocą metody griddingu. Metoda i parametry griddingu, dobrane automatycznie przez program komputerowy, pozwalają uzyskać wysokiej jakości siatkę wartości, co uwalnia użytkownika od szczegółowej znajomości metod interpolacji. W opisywanych badaniach wykorzystano w tym celu program Surfer 10.0.

#### OPIS OBIEKTU I CHARAKTERYSTYKA ZAPORY CZOŁOWEJ ZBIORNIKA WODNEGO W NIELISZU

Zbiornik wodny Nielisz jest usytuowany w dolinie rzek Wieprz i Pora, w południowo-zachodniej części województwa Lubelskiego. Jezioro to rozciąga się na terenie

kilku wsi należących do powiatu zamojskiego, są to: Nielisz, Nawóz, Deszkowie i Kulików.

Zalew został podzielony na dwie części, ze względu na położenie względem rzek. Jedna część leży w dolinie rzeki Wieprz, druga zaś w dolinie rzeki Por. Jego łączna powierzchnia wynosi 9,5 km<sup>2</sup>, a całkowita pojemność – 19,5 mln m<sup>3</sup>.

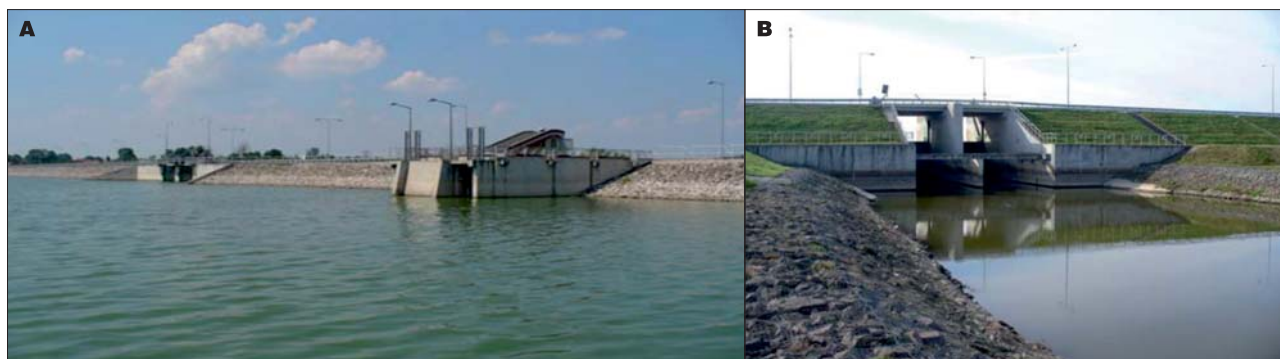
Parametry zbiornika w Nieliszu (Katedra Geotechniki 1989; Spółka Wodno-Ściekowa Wieprz, 1991; Geoproblem, 1992; Geoteko, 1992, 1994, 1995; Bipromel, 1994, 1997; Bortkiewicz & Szmagaj, 1996) przedstawiają się następująco: normalny poziom piętrzenia : NPP = 197,50 m n.p.m.; maksymalny poziom piętrzenia: max PP = 198,50 m n.p.m.; minimalny poziom piętrzenia: min PP = 195,00 m n.p.m.; powierzchnia zalewu przy NPP: Fc = 888 ha; powierzchnia zalewu przy min PP: Fm = 377 ha.

Główną budowlą hydrotechniczną położoną na tym obiekcie jest zapora czołowa (ryc. 2A). Dodatkowo, w celu okresowego piętrzenia wody, został wybudowany jaz oraz grobla. Jaz jest umiejscowiony w okolicach prawego przyczółka (ryc. 2B). Zapora czołowa została zbudowana na terenie wsi Nielisz. Jej łączna długość wynosi 845 m, a maksymalna wysokość 6,5 m, zaś wysokość piętrzenia 8,58 m (Katedra Geotechniki, 1989; Spółka Wodno-Ściekowa Wieprz, 1991; Geoproblem, 1992, Geoteko, 1992, 1994, 1995; Bipromel, 1994, 1997; Bortkiewicz & Szmagaj, 1996).

Na terenie zbiornika znajdują się niskie holocenijskie tarasy zalewowe. Od tarasów wysokich separuje je krawędź o dużym spadku. Wysokość bezwzględna tarasu zalewowego waha się od 191 do nawet 225,00 m n.p.m., a szczegółowo wynosi: taras zalewowy rzeki Wieprz – 191,00–207,00 m n.p.m; rzeki Por – 195,00–204,00 m n.p.m; maksymalna wysokość tarasu wysokiego – 225,00 m n.p.m.

#### Charakterystyka warunków geotechnicznych

Podstawowym dokumentem określającym warunki posadowienia oraz ich przynależność do kategorii geotechnicznej określa Eurokod 7 (EN 1997-1:2008). Bazując na podziale wyznaczonym przez Eurokod, zapórę czołową w Nieliszu można zaliczyć do 3 kategorii geotechnicznej w kategorii zagrożenia bezpieczeństwa (Garbulewski i in., 2007; Rabarijoely, 2012; Rabarijoely i in., 2013). Wpływa na to występowanie gruntów słabonośnych, skomplikowane warunki posadowienia oraz obciążenia danej konstrukcji. Na terenie posadowienia zapory czołowej występują grunty organiczne oraz spoiste w stanie miękkoplastycznym.



Ryc. 2. Zapora czołowa w Nieliszu (A), jaz zapory czołowej zbiornika głównego (B)  
Fig. 2. The Nielisz dam (A) and the front of its main reservoir (B)

**Tab. 1.** Właściwości fizyczne gruntów organicznych w Nieliszu (Rabarijoely, 2000; Lechowicz i in., 2004)  
**Table 1.** Index properties of organic soils at the Nielisz test sites (Rabarijoely, 2000; Lechowicz et al., 2004)

Obiekt Site	Rodzaj gruntu Soi type	Zawartość cz. organ. Organic content $I_{om}$ [%]	Zawartość $CaCO_3$ $CaCO_3$ content [%]	Wilgotność Water content $w_n$ [%]	Granica płynności Liquid limit $w_L$ [%]	Gęstość / Density	
						objętościowa Unit weight of soil $\rho$ [ $t/m^3$ ]	właściwa Specific weight of soil $\rho_s$ [ $t/m^3$ ]
Nielisz	namuł organiczny organic mud $M_{or}$	20–30	–	120–150	130–150	1,25–1,30	2,25–2,30
	namuł organiczny organic mud $M_{or}$	10–20	–	105–120	110–130	1,30–1,45	2,30–2,40

Litologia oraz miąższość warstw jest bardzo zróżnicowana. Miąższość utworów holocenijskich w tarasie wynosi trzy do pięciu metrów, składa się głównie z pyłów, pyłów piaszczystych, gruntów organicznych oraz piasków pylastych. Głębiej znajduje się 3-metrowa warstwa utworów plejstocenijskich, w skład których wchodzi między innymi glina pylasta, pył oraz pył piaszczysty. Poniżej znajdują się już grunty niespoiste pochodzenia lodowcowego.

Dzięki pracownikom Katedry Geoinżynierii SGGW, którzy wykonali badania terenowe oraz laboratoryjne na omawianym obiekcie, określono właściwości fizyczne warstw namułów organicznych występujących pod planowaną zaporą czołową. Właściwości fizyczne gruntu w podłożu omawianego obiektu zostały określone podczas wcześniejszych badań SGGW. Warstwa gruntów słabonośnych ma miąższość 3–5 m, a grunt jest lekko prekonsolidowany (Rabarijoely, 2000; Lechowicz i in., 2004; Rabarijoely i in., 2008). Wyniki z przeprowadzonych badań przedstawiono w tabeli 1.

#### Wyniki sondowań statycznych (CPT/CPTU) i sondowań dylatometrycznych (DMT)

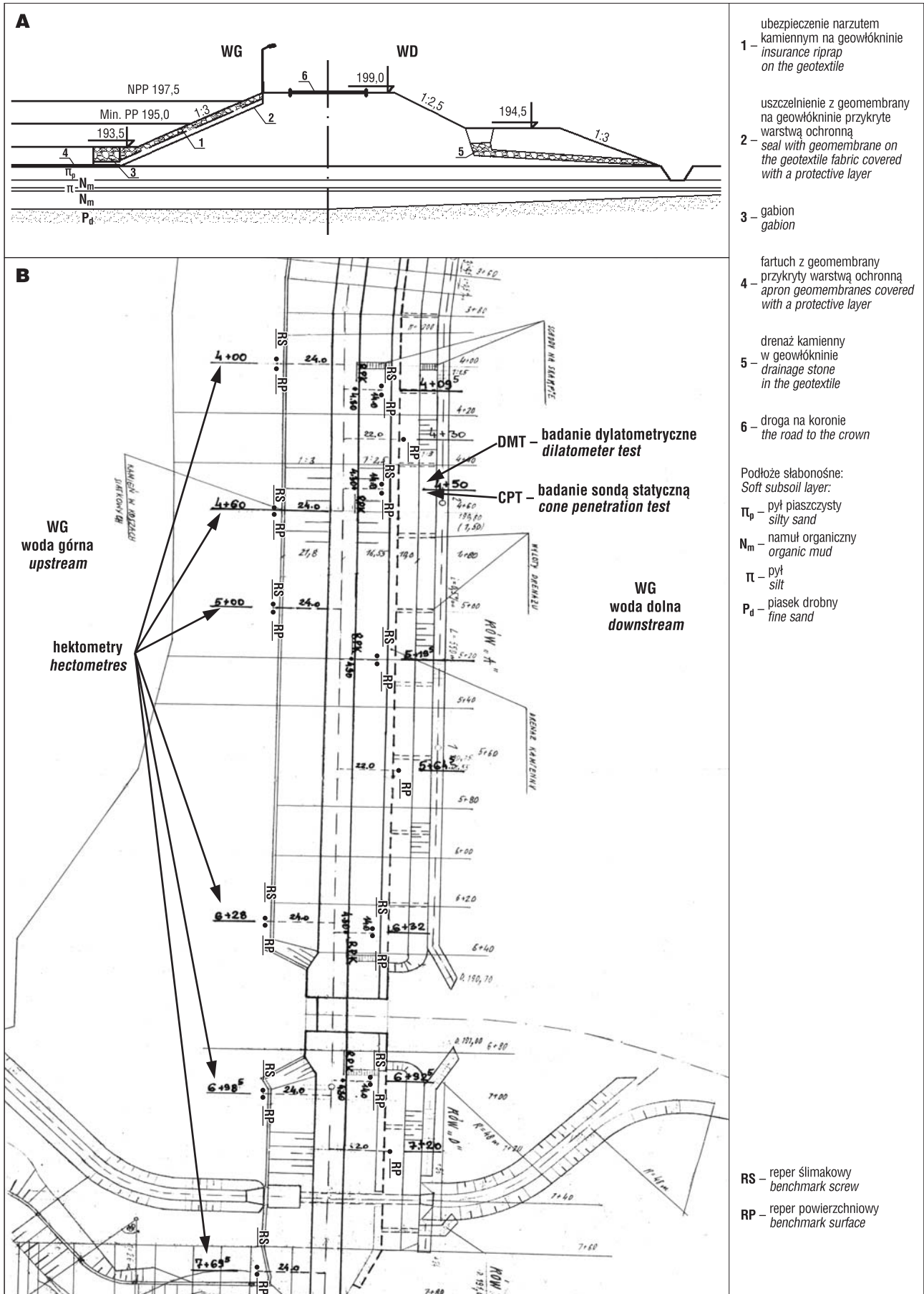
Na podstawie badań geotechnicznych, przeprowadzonych w latach 1992–1996, zostały określone cechy geologiczne podłoża pod zaporą w Nieliszu. Pozwoliła na to interpretacja danych z wierceń, sondowań CPT i DMT oraz PSO (*Particle Swarm Optimization*; 30 i 22 oraz 19 profili, odpowiednio) i kompleksowych badań laboratoryjnych (tab. 1). Analizując dane zebrane w raporcie badań podłoża GIR (*Ground Investigation Report*), w miejscu badania podłoża pod zaporą (ryc. 3) stwierdzono pięć warstw geotechnicznych. Sondowania były przeprowadzone na 12 hektometrach (hm 0+70, hm 1+90, hm 3+00, hm 4+10, hm 4+50, hm 5+20, hm 6+00, jaz – hm 6+47, hm 7+00, hm 7+30, hm 8+00). Wykonano je w trzech miejscach każdego hektometra (WG – woda górna, K – korona oraz WD – woda dolna). Odległość pomiędzy punktami par sondowań CPT/DMT obok siebie na danym hektometrze wynosi od 20 do 24 m.

Wyniki badań uzyskane w profilu badawczym od stromy wody górnej (WG) przed obciążeniem i pod koniec pierwszego etapu (5,5 miesiąca od rozpoczęcia budowy), przedstawione w postaci profili pomierzonych wartości sondowań statycznych gruntu (oporu stożka  $q_c$ , tarcia na tulei  $f_s$  oraz współczynnika tarcia  $R_f$ ), ilustruje rycina 4A.

Wartości uzyskanych oporów stożka w profilach badawczych wykonanych poza strefą obciążoną porównane z wartościami otrzymanymi w profilach wykonanych pod nasypem przeciążeniowym wykazują istotne zmiany wywołane procesem konsolidacji.

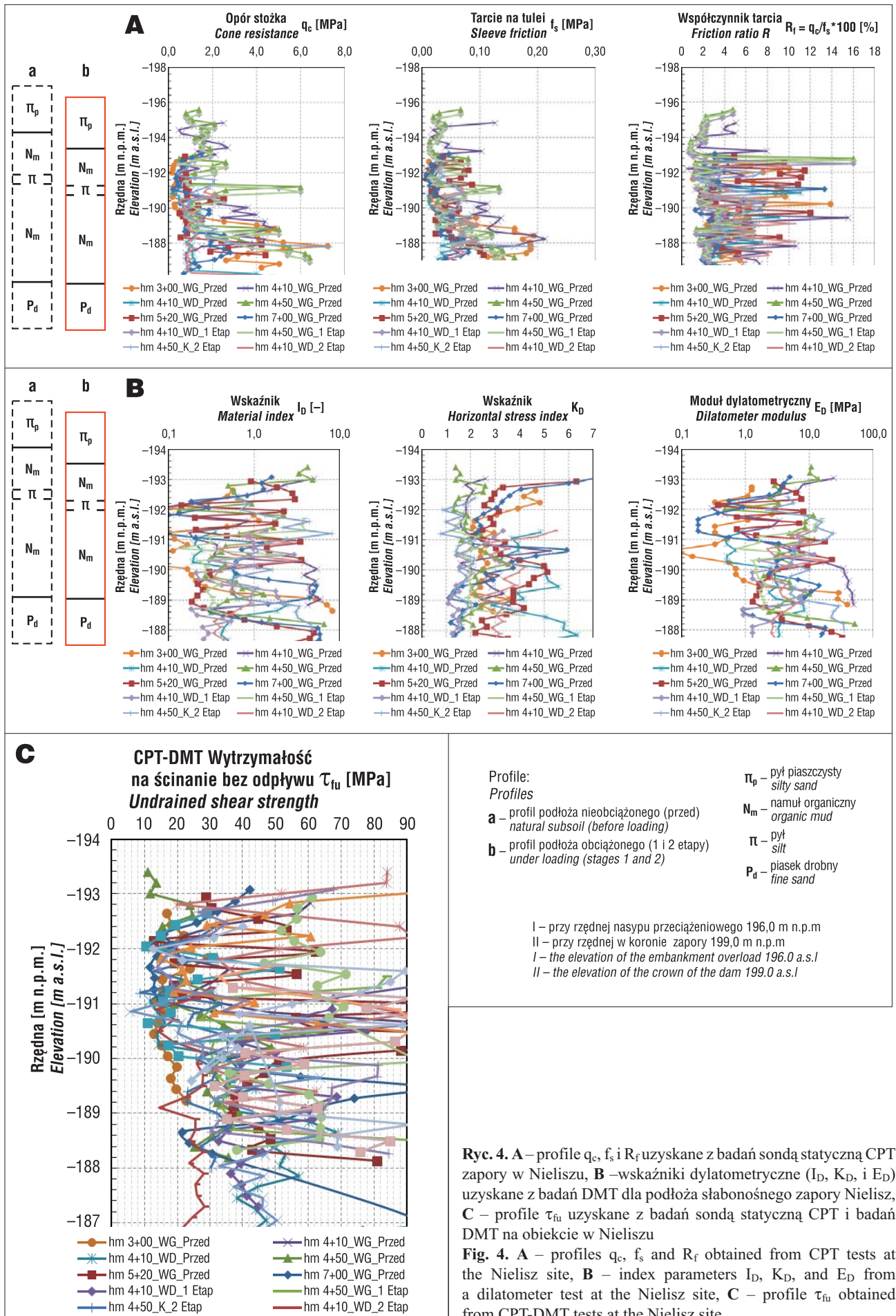
Skutkiem wzrostu naprężenia efektywnego ponad początkową wartość naprężenia prekonsolidacji jest zwiększenie oporu stożka do wartości ok. 1,2 MPa oraz zmniejszenie współczynnika tarcia  $R_f$ . Natomiast uzyskane wyniki badań dylatometrycznych w tych samych profilach badawczych, przedstawione w postaci profili pomierzonych wartości dylatometrycznych wskaźników gruntu: wskaźnika materiałowego  $I_D$ , wskaźnika naprężenia poziomego  $K_D$  oraz modułu dylatometrycznego  $E_D$ , przedstawiono na rycinie 4B. Wartości wskaźników dylatometrycznych, uzyskanych w profilach wykonanych poza strefą obciążoną porównane z wartościami otrzymanymi w profilach pod nasypem przeciążeniowym, wykazują również istotne zmiany wywołane procesem konsolidacji. Skutkiem wzrostu naprężenia efektywnego ponad początkową wartość naprężenia prekonsolidacji jest zmniejszenie wskaźnika naprężenia poziomego  $K_D$  do wartości ok. 2,0 (wskazującej stan normalnie konsolidowany) i zwiększenie wskaźnika materiałowego  $I_D$ . W wyniku konsolidacji podłoża organicznego moduł dylatometryczny  $E_D$  uległ kilkukrotnemu zwiększeniu. Na podstawie sondowań CPT i DMT wykonanych w podłożu zapory można stwierdzić, że wartości wytrzymałości na ścinanie bez odpływu  $\tau_{fu}$  zmienia się od 12 do 90 kPa (ryc. 4C). Pierwszym krokiem po wykonaniu sondowań jest analiza statystyczna zgromadzonych pomiarów wykonanych za pomocą sondowań CPT i DMT lub badań laboratoryjnych oraz obserwacji geodezyjnych. Wyniki otrzymane w 1994 r. przedstawiają parametry podłoża pod nasypem obciążającym. W 1995 i 1996 r. powtórnie wykonano badania sondą CPT i DMT po zdjęciu nasypu obciążającego. Na potrzeby tego artykułu przeanalizowano wszystkie wyniki sondowań wykonanych na zapory w latach 1992–1996 (ryc. 4A–C).

Tabela 2 przedstawia wyniki analizy uzyskane na podstawie badań CPT oraz DMT, przeprowadzonych pod zaporą czołową w Nieliszu, metodą klasyczną oraz bayesowską. Wyniki obu metod było analizowano oddzielnie. Do analizy wykorzystano wartości wytrzymałości na ścinanie bez odpływu  $\tau_{fu}$ . Dla wartości  $\tau_{fu}$  określono obszar zmienności parametru oraz przedział ufności. Na rycinie 5 przedstawiono wykresy wygenerowane za pomocą programu BAYANAL.



Ryc. 3. A – przekrój poprzeczny zapory Nielisz, B – lokalizacja sondowań CPT i DMT wykonanych na rejonie zapory czołowej w Nieliszu

Fig. 3. A – The cross section of the Nielisz dam, B – location of CPT and DMT performed at the Nielisz site

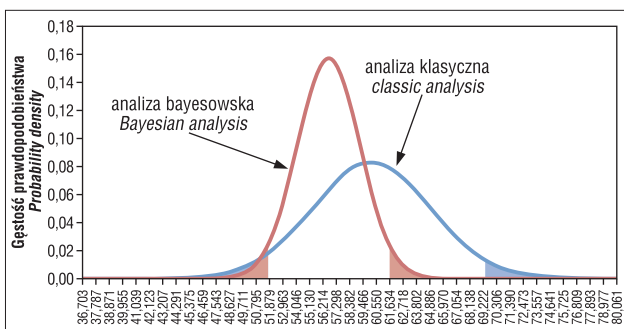


**Ryc. 4.** A – profile  $q_c$ ,  $f_s$  i  $R_f$  uzyskane z badań sondą statyczną CPT zapory w Nieliszu, B – wskaźniki dylatometryczne ( $I_D$ ,  $K_D$ , i  $E_D$ ) uzyskane z badań DMT dla podłoża słabonośnego zapory Nielisz, C – profile  $\tau_{fu}$  uzyskane z badań sondą statyczną CPT i badań DMT na obiekcie w Nieliszu

**Fig. 4.** A – profiles  $q_c$ ,  $f_s$  and  $R_f$  obtained from CPT tests at the Nielisz site, B – index parameters  $I_D$ ,  $K_D$ , and  $E_D$  from a dilatometer test at the Nielisz site, C – profile  $\tau_{fu}$  obtained from CPT-DMT tests at the Nielisz site

**Tab. 2.** Wyniki raportu uzyskanego metodami klasyczną oraz bayesowską dla gruntów organicznych oraz dla pyłu piaszczystego z badań sondą CPT i DMT pod zaporą wodną w Nieliszu**Table 2.** Report results obtained from the classic and bayesian approaches to organic subsoil and sandy silt based on CPT and DMT tests from the Nielisz dam

Analiza statystyczna dla parametru $\tau_{fu}$ – warstwa namułu górnego					
1994 r. – poziom istotności: 5%, liczba prób 11, liczba danych: 47; test Shapiro-Wilka – H0: nie; W-stat. 0,888; p-val. 9E-05					
1995–1996 r. – poziom istotności: 5%, liczba prób 3, liczba danych: 23; test Shapiro-Wilka – H0: nie; W-stat. 0,880; p-val. 1,01%					
Metoda Bayesa / Bayesian approach			Metoda klasyczna/ classic analysis		
Elementy analizy Elements of analysis	1994 [kPa]	1995–1996 [kPa]	Elementy analizy Elements of analysis	1994 [kPa]	1995–1996 [kPa]
Wartość średnia Mean values	24,8	73,3	wartość średnia Mean values	28,8	80,7
Odchylenie średniej Deviation of the mean	0,8	7,4	odchylenie standardowe Standard deviation	18,4	44,5
Zbiór wiarygodny Credible set	23,2	58,7	przedział ufności Confidence interval	23,6	62,5
Prawdopodobieństwo 0,95 Probability 0.95	26,4	87,8	poziom ufności 0,95 Significance level 0.95	34,1	98,9
Analiza statystyczna dla parametru $\tau_{fu}$ – warstwa pyłu piaszczystego					
1994 r. – poziom istotności 5%, liczba prób 3, liczba danych 10; test Shapiro-Wilka – H0: nie; W-stat. 0,886; p-val. 1,06%					
1995–1996 r. – poziom istotności 5%, liczba prób 3, liczba danych 8; test Shapiro-Wilka – H0: nie; W-stat. 0,809; p-val. 3,64%					
Wartość średnia Mean values	75,9	55,56	wartość średnia Mean values	56,4	68,3
Odchylenie średniej Deviation of the mean	2,7	5,172	odchylenie standardowe Standard deviation	30,9	29,6
Zbiór wiarygodny Credible set	70,7	45,43	przedział ufności Confidence interval	37,3	47,8
Prawdopodobieństwo 0,95 Probability 0.95	81,2	65,7	poziom ufności 0,95 Significance level 0.95	75,6	88,8
Analiza statystyczna dla parametru $\tau_{fu}$ – warstwa namułu dolnego					
1994 r. – poziom istotności 5%, liczba prób 10, liczba danych 74; test Shapiro-Wilka – H0: nie; W-stat. 0,8884; p-val. 9E-05					
1995–1996 r. – poziom istotności 5%, liczba prób 3, liczba danych 41; test Shapiro-Wilka – H0: nie; W-stat. 0,754; p-val. 7E-07					
Wartość średnia Mean values	26,2	56,6	wartość średnia Mean values	44,0	60,1
Odchylenie średniej Deviation of the mean	0,9	2,5	odchylenie standardowe Standard deviation	21,5	30,4
Zbiór wiarygodny Credible set	24,4	51,7	przedział ufności Confidence interval	39,1	50,8
Prawdopodobieństwo 0,95 Probability 0.95	28,0	61,6	poziom ufności 0,95 Significance level 0.95	48,9	69,4

**Ryc. 5.** Zależność badanego parametru  $\tau_{fu}$  od gęstości prawdopodobieństwa wykonanych w rejonie zapory czołowej w Nieliszu**Fig. 5.** Dependence of the tested parameter  $\tau_{fu}$  on the probability density performed in the region of the Nielisz dam

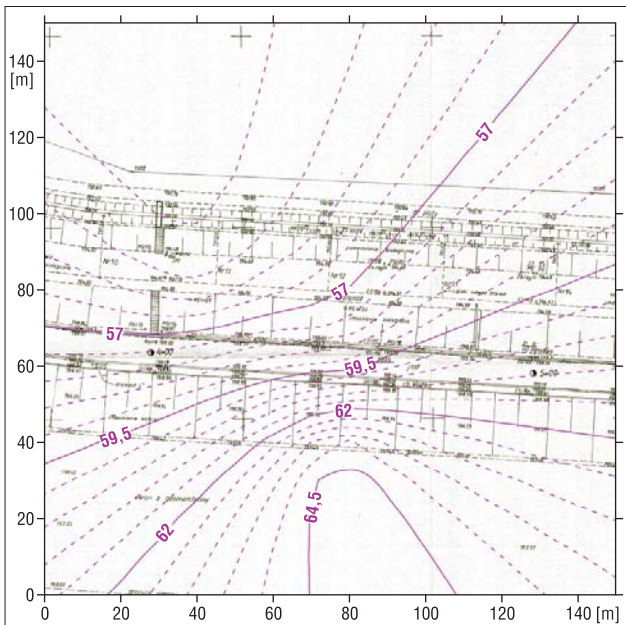
Przedstawiają one zależność badanego parametru  $\tau_{fu}$  od gęstości prawdopodobieństwa (na poziomie istotności 0,95).

Do programu Surfer 10.0 wykorzystano wszystkie „wartości wyprowadzone” uzyskane z sondowań na obiekcie w Nieliszu (ryc. 6, 7).

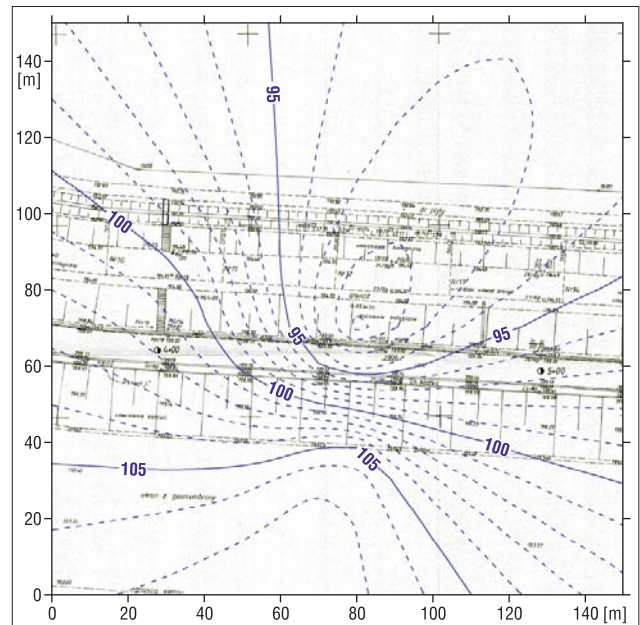
W tabeli 2 przedstawiono wartości  $\tau_{fu}$  dla namułu organicznego oraz dla pyłu piaszczystego, z badań sondą CPT i DMT uzyskanego pod zaporą wodną w Nieliszu, otrzymane metodą klasyczną oraz bayesowską. Na rycinach 6 i 7 przedstawiono mapy izolinii wygenerowane przez program Surfer 10.0. Dzięki temu oprogramowaniu było możliwe wykonanie modelu 3D podłoża gruntowego (ryc. 8).

### Interpretacja uzyskanych wyników

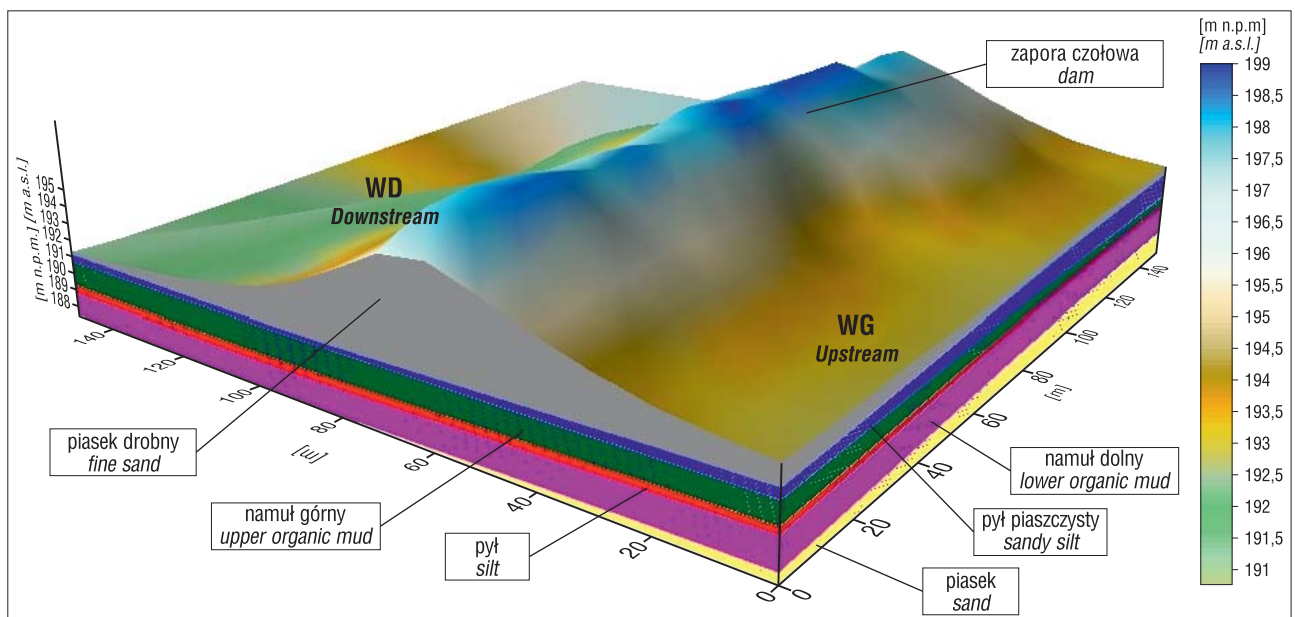
Analizując wyniki uzyskane za pomocą metody wnioskowania klasycznego oraz metody Bayesa można stwierdzić, że po zastosowaniu nasypu przeciążającego parametry gruntowe uległy dużej zmianie. Z danych zamieszczonych na rycinach 4–7 i w tabeli 2 wynika, że wytrzymałość na ścinanie bez odplywu  $\tau_{fu}$  otrzymana z badań polowych przeprowadzonych w latach 1995 i 1996 jest o ok. 20 kPa większa niż w badaniach z 1994 r. Przeglądając się tabeli 2, można zauważyć, że w niektórych przypadkach obszar zmienności parametru jest dość duży, co jest odzwierciedlone dużym odchyleniem standardowym. Wpływ na to



**Ryc. 6.** Izolinie wytrzymałości na ścinanie bez odpływu  $\tau_{fi}$  [kPa] dla namułu górnego na podstawie badań z lat 1995 i 1996  
**Fig. 6.** Isolines of undrained shear strength  $\tau_{fi}$  [kPa] for a mud layer based on research from the years 1995 and 1996



**Ryc. 7.** Izolinie wytrzymałości na ścinanie bez odpływu  $\tau_{fi}$  [kPa] dla pyłu piaszczystego na podstawie badań z lat 1995 i 1996  
**Fig. 7.** Isolines of undrained shear strength  $\tau_{fi}$  [kPa] for a sandy silt layer based on research from the years 1995 and 1996



**Ryc. 8.** Widok 3D podłoża gruntowego pod zapórą czołową w Nieliszu (opracowane na podstawie badań CPT i DMT z lat 1995, 1996)  
**Fig. 8.** The 3D view of the organic subsoil of the Nielisz dam (based on CPT and DMT tests and geodesic observation from the years 1995 and 1996)

może mieć nieliniowość charakterystyki współczynnika  $N_{kt}$  w przypadku wyników z sondowań CPT. Dodatkowo analizując raport uzyskany z analizy statystycznej klasycznej oraz bayesowskiej, można zaobserwować różnice pomiędzy wartościami w kolejnych próbach (tab. 2). Rozpatrując wyniki uzyskane za pomocą programu BAYANAL (ryc. 4C, tab. 2) można dostrzec, że zakres zmienności badanych parametrów jest mniejszy, co wskazuje na większą dokładność tej metody niż wnioskowania klasyczną analizą statystyczną. Metoda krigingu umożliwia interpolację wartości pomiędzy punktami pomiarowymi, tworząc „mapę”. Dodatkowo gotowe mapy izolinii przedstawiają

tylko informacje na temat tego, jak kształtuje się wielkość parametru na badanym terenie.

Kierując się dokładniejszą analizą badanych parametrów geotechnicznych, można zauważyć, że wartości wytrzymałości na ścinanie w warstwie pierwszej (pył piaszczysty) przed zastosowaniem nasypu przeciążającego wahają się w granicach 10–50 kPa, a po zastosowaniu tej technologii wynoszą 91–107 kPa. W przypadku warstwy namułu górnego zaobserwowano, że zmieniła się jedynie dolna granica zakresu parametru  $\tau_{fi}$  z 12 kPa na 43 kPa. Wykonano także, przedstawiony na rycinie 8, model 3D podłoża gruntowego. Widać na nim warstwę pyłu piaszczystego.



czystego, którego miąższość zmniejsza się w kierunku od wody dolnej do górnej. Miąższość warstwy namułu górnego waha się w granicach od 2,0 do 0,5 m, widoczna jest też cienka warstwa pyłu między dwoma namułami. Najniżej zalegający namuł występuje po stronie wody dolnej, jednak większa miąższość tego gruntu znajduje się po stronie wody górnej (ma ok. 2 m miąższości). Pod ostatnią badaną warstwą namułu znajdują się jeszcze piaski.

### PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiano charakterystykę obiektu w Nieliszu pod względem jego lokalizacji, występujących warunków geotechnicznych oraz technologii wykonania. Ze względu na trudne warunki gruntowe przy budowie zapory czołowej zastosowano metodę nasypu przeciążającego. Mając na uwadze ten fakt, w artykule zaprezentowano badania terenowe z roku 1994 (przed zastosowaniem nasypu) oraz z lat 1995–1996 (po usunięciu nasypu dociążającego). Do analizy statystycznej w artykule wykorzystano wyniki uzyskane z badań terenowych sondą statyczną CPT oraz z badań dylatometrycznych DMT.

Przeprowadzono analizę parametrów geotechnicznych z wykorzystaniem metod statystycznych, takich jak: analiza klasyczna oraz bayesowska. Wyniki przeprowadzonej analizy zestawiono w formie tabel, wykresów oraz map izolinii. Analiza przestrzennej zmienności parametrów wytrzymałości na ścinanie bez odpływu  $\tau_{fi}$  pod zaporą w Nieliszu umożliwiła podjęcie decyzji co do tempa budowy nasypu w różnych strefach zapory czołowej (woda górna – WG, korona – K oraz woda dolna – WD). Pod wpływem wzrostu konsolidacji zauważano równoczesny wzrost wytrzymałości na ścinanie bez odpływu  $\tau_{fi}$  w podłożu organicznym (namuł organiczny) pod zaporą. Z przedstawionych w niniejszym artykule analiz przestrzennej zmienności parametru  $\tau_{fi}$  pod zaporą wynika, że średnie jego wartości, w przypadku badań wykonanych sondą statyczną CPT i badań DMT na obiekcie w Nieliszu w 1994 r. wg metody Bayesa i metody klasycznej, wynoszą odpowiednio: 25 kPa i 29 kPa (namuł górny), 76 kPa, 56 kPa (pył piaszczysty), 26 kPa, 44 kPa (namuł dolny). Uwzględniając tylko badania przeprowadzone w latach 1995–1996 r. średnie wartości  $\tau_{fi}$  uzyskane metodą Bayesa i klasyczną w kolejności wynoszą: 73 kPa i 80 kPa (namuł górny); 56 kPa, 68 kPa (pył piaszczysty); 57 kPa, 60 kPa (namuł dolny). Wartości średnie  $\tau_{fi}$  wyznaczone metodą klasyczną z wszystkich badań CPT i DMT są wyraźnie większe od uzyskanych z analizy bayesowskiej, przy czym różnica ta dla  $\tau_{fi}$  wynosi od 10 do 20%. Oprócz tego można zauważyć, że  $\tau_{fi}$  maleje od wartości związanych z WG w kierunku wartości odnoszących się do WD.

Należy zwrócić uwagę, że wyniki analiz statystycznych dla namulów organicznych i pyłu piaszczystego pod zaporą w Nieliszu wykazują duży zakres zmienności pomiarów i świadczą o niejednorodności pakietów osadów i zmienności facji.

Publikacja została przygotowana w ramach prac własnych. Autor dziękuje Recenzentom niniejszej pracy za wnikliwe i cenne uwagi do pierwotnej wersji artykułu.

### LITERATURA

- ASOAKA A. & GRIVAS D.A. 1982 – Spatial variability of the undrained strength of clays. *ASCE, J. Eng. Mech.*, 108 (5):743–756.
- BAECHER G.B. & CHRISTIAN J.T. 2003 – Reliability and statistics in geotechnical engineering. John Wiley & Sons Inc.
- BILSKI P. & RABARIJOELY S. 2009 – Automated soil categorization using CPT and DMT investigations. *New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Second International Conference: May 28–30, 2009, Nicosia: 368–375.*
- BIPROMEL 1994 – Zbiornik wodny Nielisz – zapora czołowa, projekt techniczny. Bipromel Sp. z o.o. Biuro Studiów i Projektów Gospodarki Wodnej Rolnictwa, Warszawa.
- BIPROMEL 1997 – Dokumentacja geologiczna piezometrów otwartych wykonanych w korpusie zapory czołowej zbiornika Nielisz. Bipromel Sp. z o.o. Biuro Studiów i Projektów Gospodarki Wodnej Rolnictwa, Warszawa.
- BORTKIEWICZ A. & SZMAGAJ J. 1996 – Zbiornik Nielisz – charakterystyka konstrukcyjna obiektów zapory czołowej. *Prz. Nauk. Wydz. Melioracji i Inżynierii Środowiska*, 12: 291–302.
- CLARK I. 1979 – *Practical Geostatistics*, Applied Science Publishers Ltd., London, s. 129.
- EVERITT B. 1974 – *Cluster Analysis*, Halsted-Wiley, N.Y.
- GARBULEWSKI K., JABLONOWSKI S. & RABARIJOELY S. 2007 – Zastosowanie analizy bayesowskiej w projektowaniu geotechnicznym. *Inż. Mors. Geotech.*, 3: 163–169.
- GEOPROBLEM 1992 – Dokumentacja geologiczno-inżynierska do PT budowy zapory ziemnej stopnia Nielisz w Nieliszu, Etap II. Zamoc.
- GEOTEKO 1992 – Opracowanie technologii etapowego wykonania zapory Nielisz z wykorzystaniem konsolidacyjnego wzmocnienia podłoża. *Geoteko – Projekty i Konsultacje Geotechniczne Sp. z o.o. Wesola k. Warszawy.*
- GEOTEKO 1994 – Badania geotechniczne w celu określenia warunków umożliwiających przyspieszenie realizacji zapory czołowej zbiornika wodnego Nielisz. *Geoteko – Projekty i Konsultacje Geotechniczne Sp. z o.o. Wesola k. Warszawy.*
- GEOTEKO 1995 – Okresowe badania geotechniczne przed rozpoczęciem II etapu budowy zapory czołowej zbiornika wodnego Nielisz. *Geoteko – Projekty i Konsultacje Geotechniczne Sp. z o.o. Wesola k. Warszawy.*
- GODLEWSKI T., ŁUKASIK S. & WSZĘDYRÓWNY-NAST M. 2016 – Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego wg PN-EN-1997-2: lista dobrych praktyk. *Geoinżynieria: drogi, mosty, tunele*, 1/2016 [54]: 30–34.
- HEGAZY Y.A. & MAYNE P.W. 2002 – Objective site characterization using clustering of piezocone data. *J. Geotech. Geoenviron. Engin.*, 128 (12): 986–996.
- JAKSA M.B., KAGGWA W.S. & BROOKER P.I. 1993 – Geostatistical modelling of the spatial variation of the shear strength of a stiff, overconsolidated clay. *Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering*, Li & Lo (red.). Balkema, Rotterdam.
- KATEDRA GEOTECHNIKI 1989 – Budowa nasypów na gruntach organicznych – materiały pomocnicze do projektowania, wykonawstwa i utrzymania nasypów na gruntach organicznych. SGGW, Warszawa.
- KOKESZ Z. 2010 – Korzyści sporządzania map izolinowych procedurą krigingu zwyczajnego. *Gór. Odkryw.*, 51 (2): 91–95.
- KRAAK M.J. & ORMELING F. 1998 – Kartografia – wizualizacja danych przestrzennych. PWN, Warszawa.
- LECHOWICZ Z., RABARIJOELY S. & SZCZYPIŃSKI P. 2004 – Wykorzystanie badań dylatometrycznych do określania rodzaju gruntów organicznych. *Prz. Nauk. Wydz. Melioracji i Inżynierii Środowiska, SGGW*, XIII (2/29): 191–201.
- LI K.S. & WHITE W. 1987 – Probabilistic characterization of soil profiles. *Research Report, Dept. Civil Engg., University College, UNSW, ADFA, Canberra, Australia.*
- LIAO T. & MAYNE P.W. 2007 – Stratigraphic delineation by three-dimensional clustering of piezocone data. *GeoRisk: Assessment & Management of Risk*, 1 (2): 102–119.
- LUMB P. 1974 – Application of Statistics in Soil Mechanics, in *Soil Mechanics*. [W:] *New Horizons*. Lee I.K. (red.), American Elsevier, New York: 44–111.
- LUNNE T., ROBERTSON P. K. & POWELL J. 1997 – Cone penetration testing in geotechnical practice. E & FN Spon, London.
- MARCHETTI S. 1980 – In situ tests by flat dilatometer. *J. Geotechn. Enging Div., ASCE*, 106 (3): 299–321.
- MARMOL U. 2002 – Modelowanie reprezentacji powierzchni topograficznej z wykorzystaniem metody geostatystycznej. *Geodezja /Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica w Krakowie*, 8 (2): 259–270.
- MATHERON G. 1965 – *Les variables regionalisees et leur estimation*. Masson et Cie, Paris: 212.

- MATSUO M. & ASAOKA A. 1977 – Probability models of undrained shear strength of a Marine Clay Layer. *Soils and Foundations*, 17 (3): 53–68.
- MEIGH A.C. 1987 – Cone penetration testing methods and interpretation, CIRIA Ground Engineering Report: In-Situ Testing, Butterworths, London.
- MŁYNAREK ZB., TSCHUSCHKE W., GOGOLIK S. & GRAJEK E. 2003 – Wykorzystanie sondowań statycznych i badań dylatometrycznych do oceny zmienności cech fizycznych osadów poflotacyjnych wbudowanych w zapory składowiska Żelazny Most. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 24 (2): 93–96.
- MŁYNAREK Z., WIERZBICKI J. & WOŁYŃSKI W. 2005 – Use of cluster method for in situ tests. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 27 (1/2).
- MŁYNAREK Z., WIERZBICKI J. & WOŁYŃSKI W. 2007 – An approach to 3D subsoil model based on CPTU results. [W:] *Geotechnical Engineering in Urban Environments*. Cuellar V. i in. (red.), vol. 3. Millpress Rotterdam: 1721–1726.
- ORR T.L.L. 1993 – Probabilistic characterization of Irish till properties. [W:] Skipp B.O. (red.), *Risk and reliability in ground engineering*. Institution of Civil Engineers, Thomas Telford. London: 126–133.
- PHOON K.-K. & KULHAWY F.H. 1999a – Characterization of geotechnical variability. *Canad. Geotech. J.*, 36: 612–624.
- PHOON K.-K. & KULHAWY F.H. 1999b – Evaluation of geotechnical property variability. *Canad. Geotech. J.*, 36: 625–639.
- PN-EN 1997-1: 2008 Eurokod 7 – Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady Ogólne.
- PN-EN 1997-2: 2009 Eurokod 7 – Projektowanie geotechniczne. Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego.
- PUŁA W. 2014 – Wybrane zagadnienia dotyczące wyznaczania wartości charakterystycznych w geotechnice. *Acta Scientiarum Polonorum, Architectura*, 13 (1): 21–36.
- POPESCU R. 1995 – Stochastic variability of soil properties: data analysis, digital simulation, effects on system behaviour. PhD thesis, Princeton University.
- RABARIJOELY S. 2000 – Wykorzystanie badań dylatometrycznych do wyznaczania parametrów gruntów organicznych obciążeniem nasypem. Praca doktorska, SGGW, Warszawa.
- RABARIJOELY S. 2012 – Obliczenia stateczności zpyry w Nieliszu w odniesieniu do Eurokodu 7. *Acta Scientiarum Polonorum, Architectura*, 11 (1): 15–28.
- RABARIJOELY S., JABŁONOWSKI S., FALKOWSKI T. & GARBULEWSKI K. 2008 – Interpretacja sondowań dylatometrycznych (DMT) z wykorzystaniem analizy bayesowskiej. *Prz. Geol.*, 56 (4): 322–329.
- RABARIJOELY S., JABŁONOWSKI S. & GARBULEWSKI K. 2013 – Dobór parametrów geotechnicznych z wykorzystaniem teorii Bayesa. *Budownictwo i inżynieria środowiska*, 4 (3): 211–218.
- SCHMERTMANN J.H. 1986 – Dilatometer to compute foundation settlement. Proc. In Situ '86 ASCE Spec. Conf. Virginia Tech, Blacksburg, VA, June 1986. ASCE Geot. Special Publ., 6: 303–321.
- SCHMERTMANN J.H. 1988 – Guidelines for using the CPT, CPTU and Marchetti DMT for geotechnical design. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Office of Research and Special Studies, Report No. FHWA-PA 87-023+24, Vol. 3/4.
- SMITH M.G. & HOULSBY G.T. 1995 – Interpretation of the Marchetti dilatometer in clay. 11<sup>th</sup> European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Vol. 1, Copenhagen.
- SPÓŁKA WODNO-ŚCIEKOWA WIEPRZ 1991 – Zbiornik wodny Nielisz na rzece Wieprz, stopień czołowy – zapora ziemna z fartuchem. Projekt techniczny jednostadiowy, Zamość.
- VANMARCKE E.H. 1977 – Probabilistic modeling of soil profiles. *J. Geotech. Enging Div., ASCE*, 103, (GT11): 1227–1246.
- VANMARCKE E.H. 1994 – Stochastic finite elements and experimental measurements. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 9: 103–104.
- WIERZBICKI J. & MŁYNAREK Z. 2015 – Reprezentatywna wartość parametru geotechnicznego z badań in situ i jej wykorzystanie do konstrukcji modeli geotechnicznych. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 36 (3): 166–176.

Praca wpłynęła do redakcji 11.05.2016 r.

Akceptowano do druku 27.12.2016 r.