

ZNACZENIE TEORII BAYESA W PROJEKTOWANIU GEOTECHNICZNYM

Simon Rabarijoely, Stanisław Jabłonowski, Kazimierz Garbulewski
Szkola Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Streszczenie. W projektowaniu geotechnicznym według zasad i reguł podanych w Eurokodzie 7 [PN-EN 1997-1:2008], normie zalecanej do stosowania od 2010 roku w krajach Unii Europejskiej, jednym z najważniejszych zadań inżynierskich jest dobór parametrów do sprawdzenia wszystkich możliwych do wystąpienia w projektowanych budowlach stanów granicznych. W określaniu wartości charakterystycznych parametrów geotechnicznych, w tym wytrzymałościowych i odkształceniowych, należy w sposób ostrożny i przemyślany zastosować metody statystyczne, zarówno klasyczne, jak i podejście bayesowskie. Analiza statystyczna Bayesa uzasadniona jest szczególnie w przypadku dysponowania i uwzględniania w doborze parametrów wartości *a priori*, na przykład wartości eksperckich parametrów geotechnicznych lub w przypadku możliwości powiększania liczebności zbiorów parametrów i danych geotechnicznych, co stanowi podstawę projektowania metodą obserwacyjną. W artykule przedstawiono przykłady analiz danych geotechnicznych z wykorzystaniem teorii Bayesa, których celem było określenie wpływu zakresu badań geotechnicznych, w tym liczby i rodzaju sondowań oraz ich odległości od projektowanego obiektu, na parametry charakterystyczne podłoża. Ponadto przedstawiono znaczenie teorii Bayesa w projektowaniu stóp fundamentowych w przypadku wykorzystywania w projektowaniu metody obserwacyjnej. Wyniki analiz wskazują na przydatność teorii Bayesa w rozwiązywaniu wielu zadań geotechnicznych.

Słowa kluczowe: projektowanie geotechniczne, parametry gruntów, Eurokod 7, analiza bayesowska

WSTĘP

W projektowaniu geotechnicznym według zasad i reguł podanych w Eurokodzie 7 [PN-EN 1997-1:2008], normie zalecanej do stosowania od 2010 roku w krajach Unii Europejskiej, jednym z najważniejszych zadań inżynierskich jest dobór parametrów do

Adres do korespondencji – Corresponding author: Simon Rabarijoely, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Katedra Geoinżynierii, ul. Nowourskowska 159, 02-776 Warszawa, e-mail: simon_rabarijoely@sggw.pl

© Copyright by Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2016

sprawdzenia wszystkich możliwych do wystąpienia w projektowanych budowlach stanów granicznych. W określaniu wartości charakterystycznych parametrów geotechnicznych, w tym wytrzymałościowych i odkształceniowych, należy w sposób ostrożny i przemyślany zastosować metody statystyczne, zarówno klasyczne, jak i podejście bayesowskie [Frank i in. 2004, Garbulewski i in. 2007, Puła 2012, 2014]. Analiza statystyczna Bayesa uzasadniona jest szczególnie w przypadku dysponowania i uwzględniania w doborze parametrów wartości *a priori*, na przykład wartości eksperckich parametrów geotechnicznych lub w przypadku możliwości powiększania liczebności zbiorów parametrów i danych geotechnicznych, co stanowi podstawę projektowania metodą obserwacyjną.

Dla zmiennych losowych o ciągłym rozkładzie prawdopodobieństwa twierdzenie Bayesa można przedstawić następująco:

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

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

$f(x|\theta)$ – funkcja wiarygodności, czyli funkcja gęstości warunkowego wyniku obserwacji przy danej wartości θ ,

Ω – zbiór możliwych wartości szacowanego parametru θ ,

$f(\theta|x)$ – funkcja gęstości aposteriorycznego prawdopodobieństwa parametru θ po zaobserwowaniu wyniku x z próby.

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 θ traktuje się na kolejnym etapie jako aprioryczne prawdopodobieństwa tego parametru. W związku z tym podejście bayesowskie nazywane jest często procesem uczenia.

Do analizy statystycznej z wykorzystaniem teorii Bayesa zaproponowano stosowanie opracowanego w ramach projektu badawczego NCN-NN 506 432436 [Rabarijoely i in. 2012] numerycznego pakietu BAYANAL [Rabarijoely i in. 2013]. Podstawowymi wymaganiami dla aplikacji pakietu są: pełna integracja z programem Excel 2003 (lub wyższej wersji) pracującego w środowisku Windows, intuicyjny interfejs graficzny, możliwość automatycznego testowania hipotezy zerowej („H0”) o normalności rozkładu zmiennej losowej na podstawie poszczególnych prób. Pakiet umożliwia największą niezależność kodu aplikacji od danych źródłowych – brak ingerencji programu w dane źródłowe, łatwość przenoszenia aplikacji na różne stacje komputerowe, niezależność od organizacji danych wejściowych w plikach i arkuszach. Ponadto w pakiecie zapewniono elastyczny sposób wyboru i zaznaczania danych do analizy, możliwość pracy tak interaktywnej, jak i automatycznej, generowanie szczegółowych raportów z przeprowadzonych analiz.

W artykule przedstawiono przykłady analiz danych geotechnicznych z wykorzystaniem pakietu BAYANAL, których celem było określenie wpływu zakresu badań geotechnicznych, w tym liczby i rodzaju sondowań oraz ich odległości od projektowanego obiektu, na parametry charakterystyczne podłoża. Ponadto przedstawiono znaczenie teorii Bayesa w projektowaniu zapór nasypowych w przypadku wykorzystywania w pro-

jektowaniu metody obserwacyjnej. Wyniki analiz wskazują na przydatność teorii Bayesa w rozwiązywaniu zadań geotechnicznych.

PROJEKTOWANIE GEOTECHNICZNE WEDŁUG EUROKODU 7

Projektowanie geotechniczne budynków i obiektów inżynierskich według Eurokodu 7 przeprowadza się metodą stanów granicznych. Stany graniczne nośności (*ULS*) i użyteczności (*SLS*) sprawdza się, stosując wartości obliczeniowe parametrów geotechnicznych (X_d) określane z parametrów charakterystycznych (X_k) na podstawie wzoru:

$$X_d = X_k / \gamma_m \quad (2)$$

gdzie: γ_m – współczynnik częściowy.

W normie PN-EN 1997-1:2008 podano, że charakterystyczną wartość parametru geotechnicznego należy wybrać jako ostrożne oszacowanie wartości decydującej o wystąpieniu stanu granicznego. Dodano również, że jeśli stosowane są metody statystyczne, to zaleca się wyznaczyć taką wartość charakterystyczną, żeby obliczone prawdopodobieństwo wystąpienia mniej korzystnej wartości, decydującej o powstaniu rozpatrywanego stanu granicznego, nie było większe niż 5%; w ten sposób ostrożne oszacowanie wartości średniej polega na ustaleniu wartości średniej z ograniczonego zbioru wartości parametrów geotechnicznych na poziomie ufności 95%. W przypadku rozpatrywania zniszczenia lokalnego ostrożne oszacowanie wartości dolnej odpowiada fraktylowi 5%. Na rysunku 1 przedstawiono schemat doboru parametrów geotechnicznych z wykorzystaniem metod statystycznych oraz czynniki wpływające na dobór wartości charakterystycznej parametru geotechnicznego.

Doboru wartości charakterystycznych parametrów geotechnicznych (właściwości gruntów) należy przeprowadzać z należytą ostrożnością, wykorzystując wyniki i wartości wyprowadzone z badań laboratoryjnych i terenowych, przy czym należy uwzględnić różnicę pomiędzy właściwościami pomierzonymi w badaniach a właściwościami gruntów w masywie, wynikającymi z wpływu i zachowania się projektowanej konstrukcji geotechnicznej. Przy określaniu wartości charakterystycznych właściwości podłoża mogą być zastosowane metody statystyczne, które powinny umożliwić uwzględnienie *a priori* znajomości porównywalnego doświadczenia z właściwościami podłoża, na przykład za pomocą statystyki Bayesa. Wartości charakterystyczne mogą być wartościami dolnymi, czyli mniejszymi od wartości najbardziej prawdopodobnych, albo wartościami górnymi. Do sprawdzenia stanu granicznego należy stosować najbardziej niekorzystną kombinację dolnych i górnych wartości niezależnych parametrów.

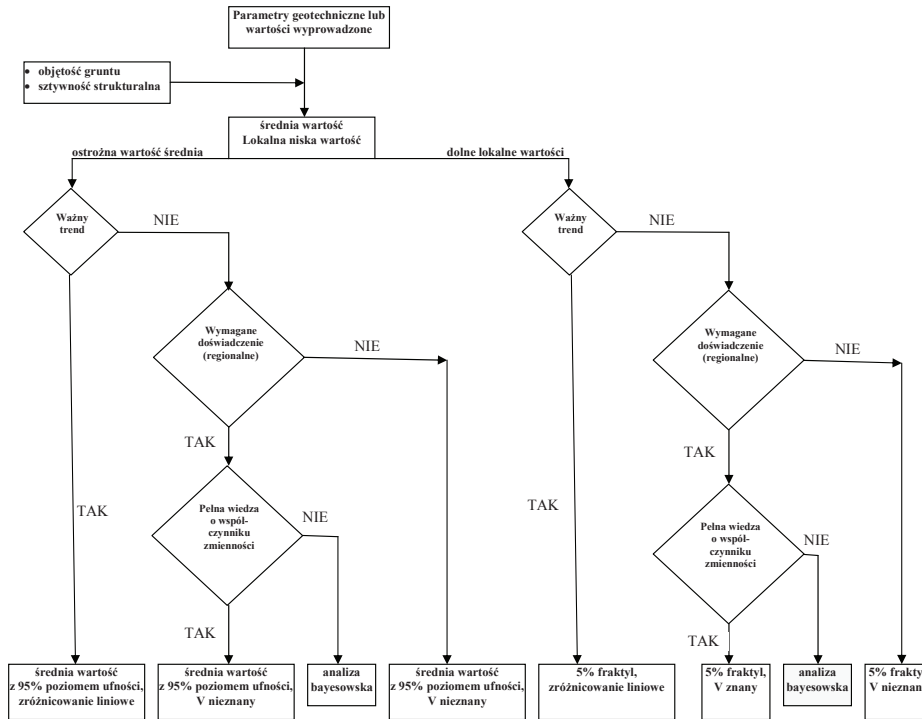
Do określania wartości charakterystycznych (X_k) należy stosować następujący wzór:

$$X_k = X_m [1 - k_n V_x] \quad (3)$$

gdzie: X_m – średnia arytmetyczna wartość parametru,

V_x – współczynnik zmienności,

k_n – współczynnik statystyczny (tablicowany).

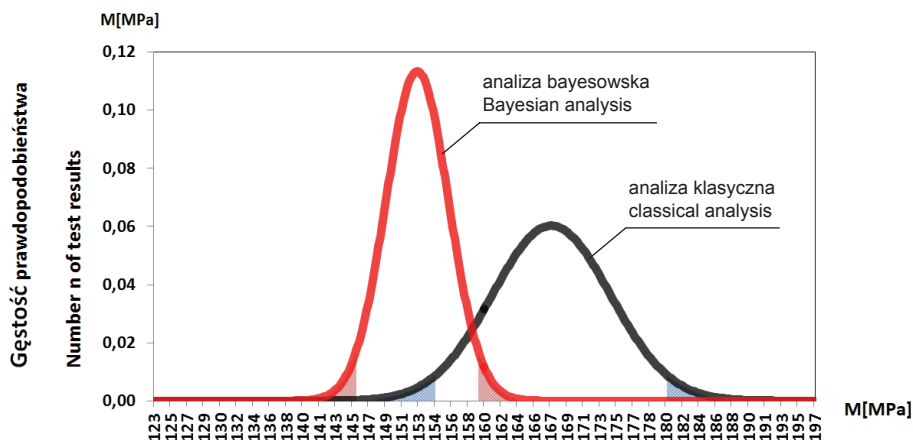


Rys. 1. Schemat oszacowania wartości charakterystycznej parametru geotechnicznego [Frank i in. 2004]

Fig. 1. Scheme to estimate the characteristic values of geotechnical parameter [Frank et al. 2004]

Na rysunku 2 pokazano rozkład gęstości prawdopodobieństwa modułów ściśliwości (M) z badań podłoża w kampusie SGGW dylatometrem Marchettiego (DMT) przy zastosowaniu klasycznej i bayesowskiej analizy statystycznej. Założono, że parametr M ma rozkład normalny.

Dotychczasowe metody statystyczne wykorzystujące w większości estymację najmniejszych kwadratów przyjmowały dane z badań terenowych i laboratoryjnych jako zamkniętą liczbę zmiennych losowych do określenia wartości oczekiwanych, wariancji i korelacji dla danego wyrażenia jako funkcji zmiennej losowej. Zasadniczą wadą stosowanej do oszacowania parametrów metody najmniejszych kwadratów są trudności w reprezentacji wiedzy o spodziewanych wartościach parametrów, które powinny wynikać z procesu estymacji. Znacznym postępem w estymacji parametrów, jak wykazują coraz liczniejsze przykłady zastosowania w różnych dziedzinach, może okazać się analiza bayesowska, w której zestaw wyników badań może być powiększany o nowe dane i na tej podstawie określane prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia. Technika uzupełniania informacji, zasada stosowana w analizie bayesowskiej, jest ściśle związana z oceną niepewności i jej praktycznym „narzędziem” – metodą obserwacyjną [Młynarek 2009, Romaniuk i in. 2013].



Rys. 2. Rozkład gęstości modułów ściśliwości (M) z badań DMT podłoża na terenie kampusu SGGW
 Fig. 2. Normal M distribution obtained for Campus SGGW using DMT tests

PROGRAMOWANIE BADAŃ GEOTECHNICZNYCH Z UWZGLĘDNIENIEM ANALIZY BAYESA

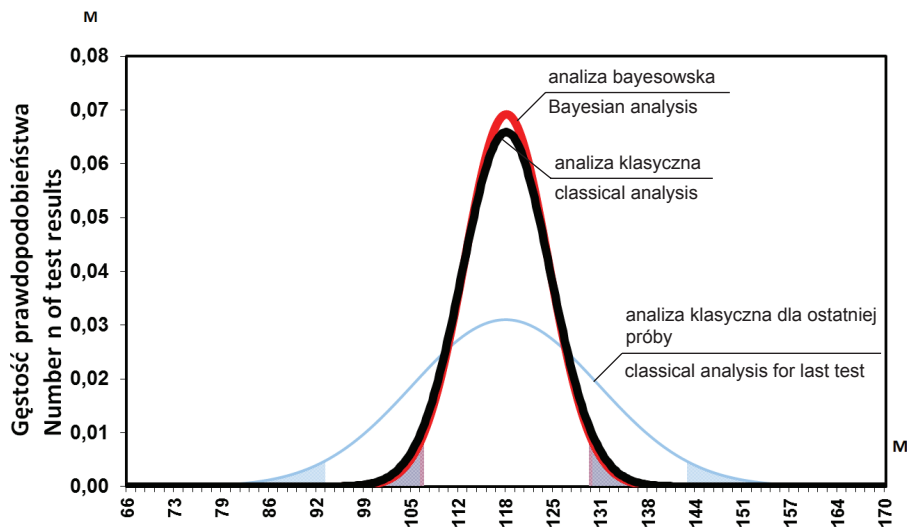
Ograniczenie lub uzupełnienie liczby badań

Wymagany w projektowaniu posadowień obiektów budowlanych zakres i ogólne zasady metodyczne badań *in situ* zostały podane w normie PN-EN 1997-2:2009 zależnie od kategorii geotechnicznej obiektu. Z definicji kategorii geotechnicznej wynika, że przy klasyfikowaniu projektowanych obiektów uwzględnia się ocenę ryzyka. W normie podano jednak tylko zasady dotyczące powszechnie stosowanych w krajach europejskich badań, które wybrano, przyjmując następujące kryteria: znaczenie w geotechnicznej praktyce, możliwość wykonywania badań przez usługowe przedsiębiorstwa oraz akceptowane w krajach UE procedury badawcze.

Zakres typowych badań podłoża w terenie obejmuje: wiercenia z pobieraniem z wytypowanych głębokości próbek gruntów o nienaruszonej strukturze za pomocą cienkościennych próbników (np. Shelby, NeSGI), badania, często w regularnych przedziałach głębokości (np. co 1,5 m), sondą SPT z pobraniem próbek gruntów do badań makroskopowych i sondowania CPTU i DMT lub coraz częściej, zwłaszcza w przypadku obiektów budowlanych 3. kategorii geotechnicznej, wieloparametryczne sondowania SCPTU (np. sondą Icone Seismic Module) i SDMT (dylatometr sejsmiczny). Pomimo że sondowanie CPTU jest szybsze (prędkość wciskania sondy wynosi $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$) i tańsze, obie metody sondowań są powszechnie zalecane i wykonywane równolegle, a wyniki badań uważane za porównywalne i równorzędne [Robertson 2009, Mayne i in. 2009, Rabarijoely i in. 2013]. Niewątpliwą jednakże zaletą, świadczącą o przewadze sondowań CPTU nad DMT, jest ciągły w profilu podłoża wynik pomiarów sondą CPTU (q_c, f_s, u), którego interpretacja pozwala na uzyskanie informacji o zmienności w podłożu gruntów i ich właściwości.

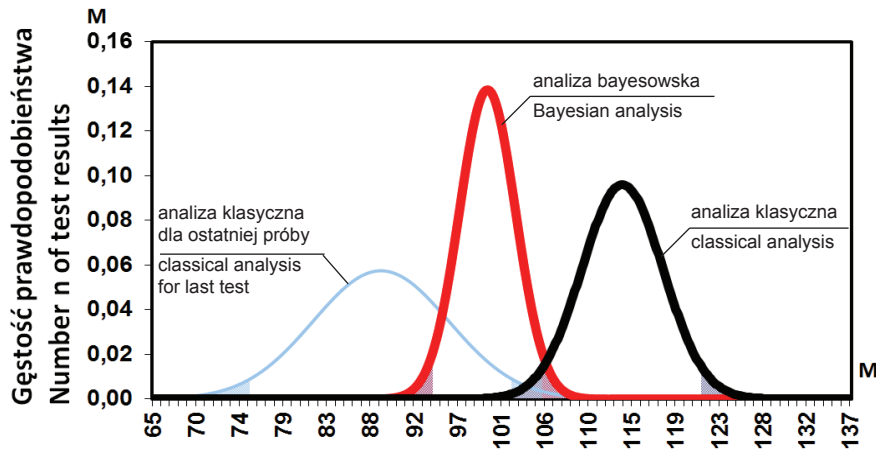
Do wyboru najbardziej efektywnej metody badań *in situ* pomocne jest w pewnym stopniu podane w Eurokodzie 7 zestawienie stosowalności obecnie dostępnego sprzętu. Interpretując wyniki badań *in situ*, można uzyskać wartości parametrów geotechnicznych najczęściej wykorzystywanych w praktyce, do których należą między innymi: parametry stanu podłoża w warunkach *in situ* (np. wskaźnik prekonsolidacji OCR), parametry wytrzymałościowe, sztywność gruntu, ścisłość i przepuszczalność hydrauliczna, czyli zestaw parametrów wyjściowych potrzebnych do sprawdzenia stanów granicznych projektowanych obiektów budowlanych. Badania i zasadnicze wymagania, które powinny być uwzględnione w trakcie ich prowadzenia w terenie, przedstawione w normie PN-EN 1997-2:2009, są na ogół powszechnie znane; mogą one stanowić pomoc jedynie dla inżynierów bez większego doświadczenia. W normie tej jak również w normach zharmonizowanych nie uwzględniono coraz powszechniej stosowanych w praktyce sond geotechnicznych wyposażonych w dodatkowe sensory pozwalające pomierzyć na przykład prędkość fali sejsmicznej lub przewodność elektryczną ośrodka gruntowego.

Analiza wyników wierceń łącznie z wynikami sondowań przeprowadzona z zastosowaniem wnioskowania Bayesa pozwala ocenić istotną zmianę rozkładu parametrów geotechnicznych w podłożu, zależnie od liczby wierceń i sondowań. Na rysunkach 3, 4 i 5 przedstawiono wyniki analizy z zastosowania wnioskowania Bayesa w przypadku 5, 6 i 7 sondowań w podłożu projektowanego budynku dydaktycznego w kampusie SGGW w Warszawie.



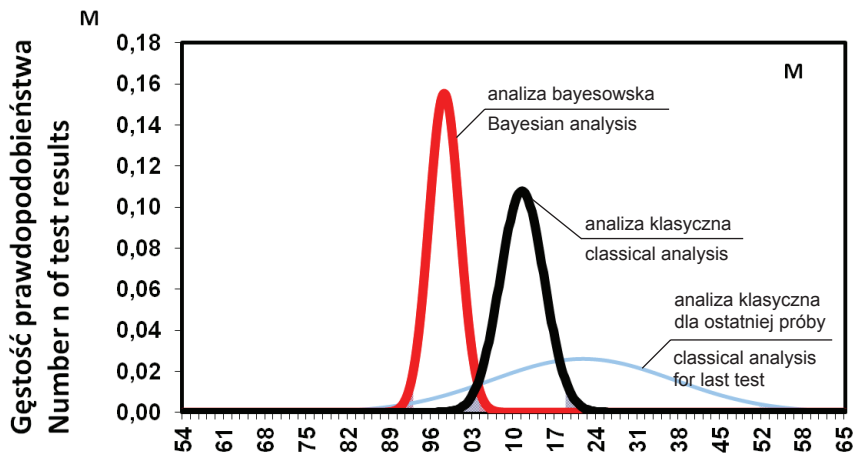
Rys. 3. Wyniki analizy statystycznej metodą klasyczną i z zastosowaniem wnioskowania Bayesa w przypadku 5 sondowań DMT w kampusie SGGW

Fig. 3. The results of statistical analysis including Bayesian approach for 5 DMT soundings at the SGGW Campus



Rys. 4. Wyniki analizy statystycznej metodą klasyczną i z zastosowaniem wnioskowania Bayesa w przypadku 6 sondowań DMT w kampusie SGGW

Fig. 4. The results of statistical analysis including Bayesian approach for 6 DMT soundings at the SGGW Campus



Rys. 5. Wyniki analizy statystycznej metodą klasyczną i z zastosowaniem wnioskowania Bayesa w przypadku 7 sondowań DMT w kampusie SGGW

Fig. 5. The results of statistical analysis including Bayesian approach for 7 DMT soundings at the SGGW Campus

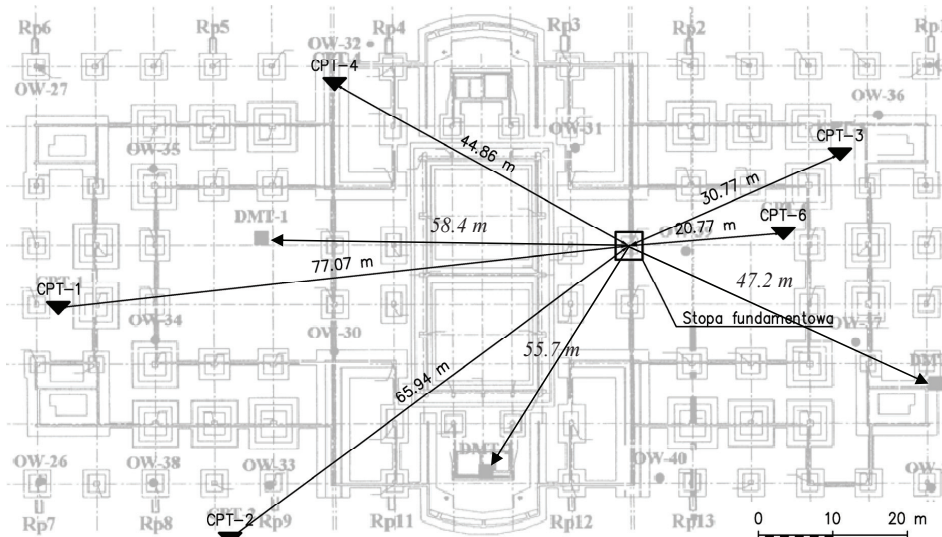
Analizując wyniki badań, stwierdzono, że wartości charakterystyczne modułu ścisłości dla warstwy glin zwałowych w podłożu, uzyskane dla 5, 6 i 7 sondowań DMT, wynoszą odpowiednio: 115, 98 i 97 MPa. Biorąc pod uwagę niewielką różnicę pomiędzy wartościami modułów ścisłości w przypadku analizy dla 6 i 7 sondowań, można uznać liczbę 6 sondowań jako wystarczająco miarodajną do określenia M .

WPLYW LOKALIZACJI BADAŃ

Do rozpoznania warunków geotechnicznych projektowanych obiektów przeprowadza się zwykle wiercenia i sondowania zlokalizowane w zmiennej odległości od obiektu. W celu zbadania, jaki wpływ na parametry geotechniczne ma odległość badań od projektowanego obiektu, przeprowadzono analizę statystyczną z wykorzystaniem podejścia bayesowskiego dla sondowań CPT i DMT, które stanowiły podstawę określenia parametrów warstwy ilów występujących w podłożu projektowanego budynku dydaktycznego w kampusie SGGW. Rozkład lokalizacji sondowań w stosunku do wybranego fundamentu budynku przedstawiono na rysunku 6. Wyniki sondowań CPT i DMT przedstawiono na rysunku 7. Rozkład wartości średnich arytmetycznych i średnich wagowych oporów stożka (q_c) i tarcia pobocznicy (f_s) pokazano na rysunku 8. Do określenia wartości średnich wagowych wykorzystano następujący wzór:

$$\bar{X}_k = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (4)$$

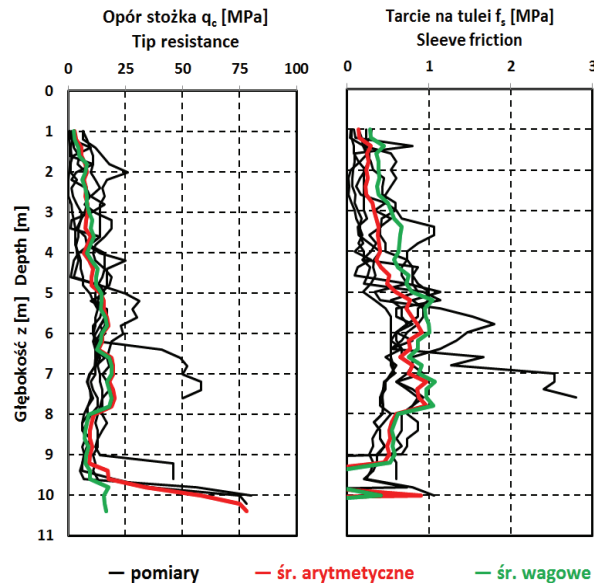
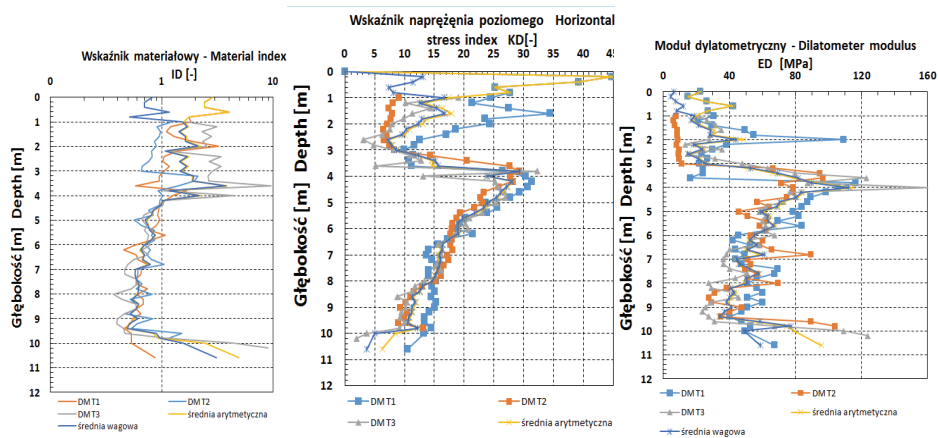
gdzie: \bar{X}_k – średnia ważona parametru geotechnicznego,
 x_i – wartość parametru geotechnicznego,
 w_i – waga parametru geotechnicznego jako stosunek odległości najmniejszej od obiektu i wynikającej z lokalizacji analizowanego sondowania.



OW – wiercenie – borehole, CPT – badanie sondą statyczną – cone penetration test, DMT – badanie dylatometrem Marchettiego – dilatometer of Marchetti test

Rys. 6. Lokalizacja sondowań CPT i DMT w kampusie SGGW

Fig. 6. Location of CPT and DMT soundings at SGGW Campus

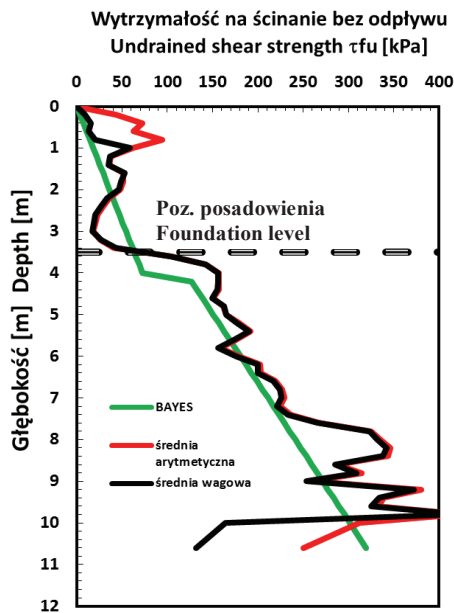
Rys. 7. Wykresy sondowań statycznych CPT (q_c i f_s) [Dokumentacja geotechniczna... 2001]Fig. 7. Profiles of q_c and f_s from CPT tests [Geotechnical documentation... 2001]

Rys. 8. Profile wskaźników dylatometrycznych [Dokumentacja geotechniczna... 2001]

Fig. 8. Profiles of indexes from DMT tests [Geotechnical documentation... 2001]

Analizując rozkład wartości średnich arytmetycznych oporów stożka (q_c) dla glin zwałowych na głębokości posadowienia fundamentu (rys. 7), należy przyjąć wartość $q_c = 11$ MPa, natomiast na podstawie rozkładu średniej ważonej – wartość $q_c = 13,5$ MPa. Biorąc pod uwagę określone wartości q_c , wytrzymałość na ścinanie glin zwałowych wynosi odpowiednio 136 i 163 kPa (rys. 9). Do określenia tych wartości wykorzystano rozkład wytrzymałości na ścinanie w podłożu projektowanego budynku z obliczeń średnich arytmetycznych, średnich wagowych i z analizy bayesowskiej. Przyjmując,

że sondowania w najbliższej odległości od projektowanego fundamentu są najbardziej wiarygodne, jego wymiary dla wskaźnika wykorzystania mniejszego od 100% wynoszą $1,30 \times 1,30$ m. W przypadku zastosowania w projektowaniu rozkładu wytrzymałości na ścinanie określonego z uwzględnieniem odległości od projektowanego fundamentu (rozkład wartości średnich wagowych) dla takiego samego wskaźnika wykorzystania wymiary fundamentu powinny wynosić: $1,25 \times 1,25$ m. W przypadku zastosowania w projektowaniu rozkładu wytrzymałości na ścinanie określonego z analizy bayesowskiej wymiary fundamentu są takie same jak w przypadku wykorzystania rozkładu wartości średnich wagowych, czyli $1,25 \times 1,25$ m. W podejściu bayesowskim przyjęto wyniki trzech badań dylatometrem w najbliższej odległości od fundamentu, czyli badania DMT1, DMT2 i DMT3.



Rys. 9. Wartości charakterystyczne wytrzymałości na ścinanie zalecane do projektowania geotechnicznego

Fig. 9. Characteristic values of shear strength recommended for geotechnical design

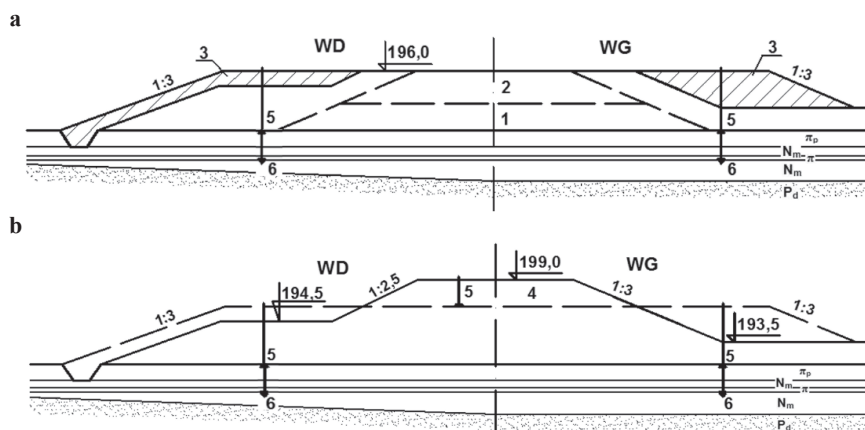
PROJEKTOWANIE Z WYKORZYSTANIEM METODY OBSERWACYJNEJ

Jak podano we wstępie, analiza statystyczna Bayesa jest szczególnie przydatna w projektowaniu geotechnicznym metodą obserwacyjną [Peck 1969]. Metoda ta znajduje zastosowanie wszędzie tam, gdzie nie ma możliwości jednoznacznie udokumentować bezpieczeństwa projektowanych budowli ze względu głównie na trudne do oceny warunki geotechniczne (złożone i skomplikowane warunki gruntowe), ale również w przypadku złożonego schematu oddziaływań geotechnicznych. Metoda obserwacyjna ogólnie polega na projektowaniu z wykorzystaniem bieżących obserwacji zachowania się

budowanego obiektu. Ciągłe powiększane zbiory danych można analizować przy wykorzystaniu wnioskowania Bayesa. Przykładem zastosowania analizy statystycznej Bayesa jest budowa etapowa zapory nasypowej w Nieliszu (rys. 10), posadowionej na namulach organicznych [Bipromel 1994, 1997, Lechowicz i in. 2015]. Budowa zapory czołowej w Nieliszu, o wysokości docelowej 6,5 m, została zrealizowana w dwóch etapach (rys. 11), przy czym wysokość nasypu w I etapie wynosiła 4,0 m, a II etap budowy został zaprojektowany na podstawie wyników obserwacji i badań podłoża gruntowego przeprowadzonych podczas realizacji pierwszego etapu.



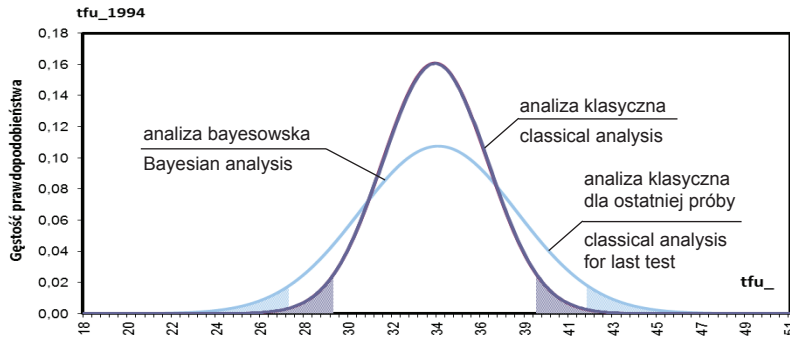
Rys. 10. Widok zapory czołowej zbiornika Nielisz (od strony WG)
Fig. 10. View of main dam at Nielisz reservoir (view from upstream)



Rys. 11. Schemat realizacji dwuetapowej budowy zapory Nielisz z przeciążeniem: a – I etap z nasypem przeciążeniowym, b – II etap z rozebraniem nasypów przeciążeniowych i podwyższeniem korpusu do rzędnej docelowej; 1 – istniejący nasyp, 2 – rozebranie istniejącego nasypu do rzędnej 194 m n.p.m., 3 – nasyp przeciążeniowy, 4 – II etap, 5 – płytkowy reper powierzchniowy, 6 – ślimakowy reper wglębny [Lechowicz i in. 2015]

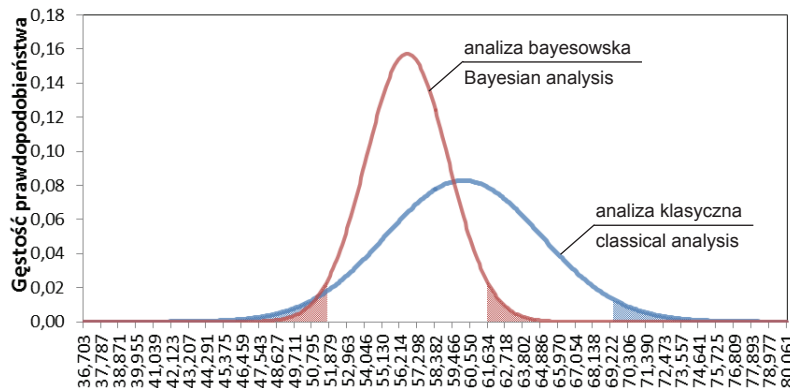
Fig. 11. The implementation scheme is a two-stage construction overload of the Nielisz dam: a – I stage of the embankment overload, b – II stage of the dismantling embankments overload and increase the body to the level of the target; 1 – the existing embankment, 2 – dismantling of the existing embankment to the elevation of 194 m above sea level, 3 – embankment overload, 4 – II stage, 5 – plate benchmark surface, 6 – screw benchmark plunger [Lechowicz et al. 2015]

Do zaprojektowania czasu konsolidacji podłoża w I etapie i realizacji budowy zapory w II etapie wykorzystano metodę obserwacyjną. Decyzję o rozpoczęciu budowy zapory w II etapie podjęto na podstawie analizy osiadań podłoża w I etapie i wyników badań zwiększenia wytrzymałości na ścinanie bez odpływu [Rabarijoely 2000] gruntów organicznych w podłożu zapory. Na rysunku 12 przedstawiono wykresy wygenerowane za pomocą programu BAYANAL, pokazujące zależność badanego dylatometrem parametru τ_{fu} od gęstości prawdopodobieństwa. Zwiększenie wytrzymałości na ścinanie (τ_{fu}) gruntów organicznych podczas I etapu budowy zapory przedstawiono na rysunku 13. Analizując rozkład gęstości τ_{fu} przedstawiony na rysunkach 12 i 13, można stwierdzić, że efektem konsolidacji podłoża podczas I etapu było zwiększenie wytrzymałości na ścinanie (τ_{fu}) z wartości 34,0 kPa do wartości 57,0 kPa. Wytrzymałość na ścinanie podłoża po I etapie budowy zastosowano do sprawdzenia stateczności nasypu zapory w II etapie.



Rys. 12. Zależność badanego parametru τ_{fu} otrzymanego z sondowań wykonanych w rejonie zapory czołowej w Nieliszu, od gęstości prawdopodobieństwa (I etap, 1994).

Fig. 12. Relationships between the tested parameter (τ_{fu}) and probability density performed on the region of the Nielisz dam (I stage, 1994).



Rys. 13. Zależność badanego parametru τ_{fu} otrzymanego z sondowań wykonanych w rejonie zapory czołowej w Nieliszu, od gęstości prawdopodobieństwa (etap II, 1995–1996)

Fig. 13. Relationships between the tested parameter τ_{fu} and probability density performed on the region of the Nielisz dam (stage II, 1995–1996)

WNIOSKI

W określaniu wartości charakterystycznych parametrów geotechnicznych, w tym wytrzymałościowych i odkształceniowych, można w sposób ostrożny i przemyślany zastosować metody statystyczne, zarówno klasyczne, jak i podejście bayesowskie. Analiza statystyczna Bayesa uzasadniona jest szczególnie w przypadku dysponowania i uwzględniania w doborze parametrów wartości *a priori*, na przykład wartości eksperckich parametrów geotechnicznych, lub w przypadku możliwości powiększania liczebności zbiorów parametrów i danych geotechnicznych, co stanowi podstawę projektowania metodą obserwacyjną.

Zastosowanie w projektowaniu geotechnicznym analizy statystycznej wyników badań z wykorzystaniem podejścia bayesowskiego daje następujące korzyści:

1. Analiza wpływu zmian parametrów geotechnicznych, wynikających ze stopniowo zwiększanej liczby badań, umożliwia podjęcia decyzji o ich ograniczeniu.
2. W analizie zmian parametrów geotechnicznych można uwzględnić odległość lokalizacji badań od projektowanego obiektu.
3. Analiza wyników osiadań podłoża łącznie z badaniami wytrzymałości na ścinanie gruntów pozwala opracować harmonogram budowy zapory etapami.
4. Program BAYANAL jest pomocny do projektowania geotechnicznego, w tym zwłaszcza w doborze parametrów geotechnicznych przy sprawdzaniu stanów granicznych.

PIŚMIENNICTWO

- Bipromel (1994). Zbiornik wodny Nielisz – zaporą czołową, projekt techniczny. Warszawa.
- Bipromel (1997). Dokumentacja geologiczna piezometrów otwartych wykonanych w korpusie zapory czołowej zbiornika Nielisz.
- Dokumentacja geotechniczna w sprawie warunków gruntowych i wodnych na terenie przeznaczonym pod dwa projektowane budynki laboratoryjno-dydaktyczne SGGW w Warszawie (2001). Katedra Geoinżynierii SGGW, Warszawa.
- Frank, R., Bauduin, C., Driscoll, R., Kavvas, M., Krebs Ovesen, N., Orr, T.L.L., Schuppener, B. (2004). Designers' Guide to EN 1997-1, Eurocode 7: Geotechnical design. Part 1: General rules. Thomas Telford, London.
- Garbulewski, K., Jabłonowski, S., Rabarijoely, S. (2007). Zastosowanie analizy bayesowskiej w projektowaniu geotechnicznym. Inżynieria Morska i Geotechnika, 3, 163–169.
- Lechowicz, Z., Rabarijoely, S., Kossowska, M., Wrzeński, G. (2015). Ocena osiadań zapory na słabonośnym podłożu z wykorzystaniem badań DMT. W: Eksploatacja budowli piętrzących – diagnostyka i zapobieganie zagrożeniom Red. J. Winter, A. Wit. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa, 241–252, 241–252.
- Mayne, P.W., Coop, M.R., Springman, S.M., Huang, A.B., Zornberg, J.G. (2009). Geomaterial behaviour and testing. State of the Art (SOA) paper. Proc. of the 17th ICSMGE, Alexandria, 2777–2872.
- Młynarek, Z. (2009). Podłoże gruntowe a awaria budowlana. XXIV Konferencja Naukowo-Techniczna „Awary budowlane”, Szczecin, 103–128.
- Peck, R.B. (1969). Ninth Rankine lecture, advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics. Geotechnique, 19 (2), 171–187.
- 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, O. (2012). Projektowanie fundamentów bezpośrednich według Eurokodu 7. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław.
- Puła, O. (2014). Wybrane zagadnienia dotyczące wyznaczania wartości charakterystycznych w geotechnice. *Architectura*, 13 (1), 21–36.
- Rabarijoely, S. (2000). Wykorzystanie badań dylatometrycznych w wyznaczeniu parametrów gruntów organicznych obciążonych nasypem. Praca doktorska. Wydział Inżynierii i Kształtowania Środowiska, SGGW, Warszawa.
- Rabarijoely, S. i in. (2012). Dobór parametrów wytrzymałościowo-odkształceniowych gruntów spoistych w projektowaniu geotechnicznym według Eurokodu 7 z wykorzystaniem analizy bayesowskiej. Projekt badawczy, N N506 432436.
- Rabarijoely, S., Jablonowski, S., Garbulewski, K. (2013). Dobór parametrów gruntów w projektowaniu geotechnicznym z wykorzystaniem teorii Bayesa. *Budownictwo i Inżynieria Środowiska* 4, 3, 211–218.
- Robertson, P.K. (2009). CPT – DMT, Correlations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1762–1771.
- Romaniuk, D., Sorbjan, P., Stefanek, P. (2013). Zastosowanie metody obserwacyjnej przy bezpiecznym wznoszeniu budowli geotechnicznych na przykładzie Obiektu Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych Żelazny Most. *Cuprum*, 1 (66), 101–111.

THE IMPORTANCE OF BAYESIAN THEORY IN GEOTECHNICAL DESIGN

Abstract. In geotechnical design of structures according to the rules and regulations given in Eurocode 7 (EN 1997-1, 2:2004. Eurocode 7 – Geotechnical design. Part 1, 2), the standard recommended for use since 2010 in the European Union, one of the most important engineering tasks is the selection of parameters to examine all of the possible limit states. In determining the characteristic values of geotechnical parameters, including strength and deformation must be as careful and thoughtful use statistical methods, both classical and Bayesian approach. Bayesian statistical analysis is justified especially in the case of disposition and consideration in the selection of parameter values a priori, for example, the expert geotechnical parameters, or if the possibility of enlarging the number of sets of parameters and geotechnical data, which forms the basis for observational method. The paper presents examples of geotechnical data analysis using Bayesian theory, the aim was to determine the effect of a range of geotechnical investigations, including the number and type of soundings and their distance from the proposed facility on the characteristic parameters of the substrate. In addition, it shows the importance of Bayesian theory in the design of footings for use in designing methods of observation. The results of the analysis indicate the usefulness of Bayesian theory in solving many tasks geotechnical.

Key words: geotechnical mapping, field investigation, CPT & DMT tests, Bayesian approach

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 31.08.2016

Cytowanie: Rabarijoely, S., Jablonowski, S., Garbulewski, K. (2016). Znaczenie teorii Bayesa w projektowaniu geotechnicznym. *Acta Sci. Pol. Architectura*, 15 (4), 127–140.