

ANALIZA PROCESU NAPEŁNIANIA GEORUR NA PODSTAWIE POLOWYCH I LABORATORYJNYCH BADAŃ GEOTECHNICZNYCH

Błażej Smoliński¹✉, Łukasz Kaczyński², Tomasz Godlewski², Paweł Popielski¹

¹ Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska

² Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono zastosowanie materiałów geosyntetycznych w budownictwie wodnym, ze szczególnym uwzględnieniem geotkanin. Omówiono technologię georur oraz możliwości ich praktycznego wykorzystania. Krótko scharakteryzowano poligon badawczy zlokalizowany na warszawskim brzegu rzeki Wisły. Na podstawie obserwacji i zdobytych doświadczeń zaprezentowano proces instalacji i napełniania płaszczu geosyntetycznego refułatem. W pracy omówiono zrealizowany program geotechnicznych badań polowych i laboratoryjnych. Sporządzony przestrzenny rozkład gęstości objętościowej szkieletu gruntowego gruntu wypełniającego georurę oraz uzyskane w odniesieniu do niego wyniki badań CPTU, DMT oraz DPL pozwalają stwierdzić występowanie nierównomiernego rozkładu parametrów geotechnicznych gruntu w georurze. Uwzględnienie tego zjawiska w procesie projektowania obiektów wykonywanych w technologii georur wydaje się być istotnym zagadnieniem z punktu widzenia bezpieczeństwa konstrukcji.

Słowa kluczowe: georury, geosyntetyki, hydrotechnika, geotechnika

WSTĘP

Hydrotechnika, podobnie jak wszystkie inne gałęzie szeroko rozumianego budownictwa, podlega ciągłym przemianom. Motywacją do rozwoju są realia rynku oraz wymagania stawiane przez inwestorów oczekujących skutecznej i szybkiej realizacji inwestycji przy jednoczesnej optymalizacji poniesionych kosztów. Zmusza to kadre inżynierską i osoby zaangażowane w proces projektowy do poszukiwania coraz efektywniejszych i bardziej wydajnych technologii charakteryzujących się jednocześnie korzystnymi wskaźnikami ekonomicznymi.

W dziedzinie budownictwa wodnego w ostatnich latach szczególną dynamikę zaobserwować można w zakresie nowych rozwiązań technicznych bazujących na wykorzystaniu materiałów geosyntetycznych (Popielski, 2017). Rozwiązaniem wartym uwagi, zwłaszcza w kontekście poprawy stanu technicznego obwałowań przeciwpowodziowych w Polsce, jest technologia georur (Smoliński, 2016). Pod pojęciem georur kryją się wielkogabarytowe, syntetyczne kontenery wykonywane z geotkanin polipropylenowych i poliestrowych. Zakres możliwości ich praktycznego zastosowania jest niezwykle szeroki i obejmuje zagadnienia od konstrukcji i modernizacji budowli regulacyjnych (wały, ostrogi), przez falochrony i przeciwerozyjne umocnienia brzegowe, aż po sztuczne wyspy, laguny i odwadnianie osadów dennych (Pilarczyk, 2000).

W kontekście elementów konstrukcyjnych głównymi zaletami technologii georur są szybkość realizacji inwestycji oraz względy ekonomiczne. Wypełnienie płaszczu geosyntetycznego stanowi zwykle refułat pobierany bezpośrednio ze zbiornika wodnego. Znacznie ograniczone zostają również koszty związane z robotami betono-

✉ blazej.smolinski@is.pw.edu.pl

wymi i wykonaniem narzutów kamiennych. Postęp technologiczny w zakresie produkcji materiałów geosyntetycznych powoduje, że obecnie dostępne na rynku wyroby charakteryzują się również coraz lepszą odpornością na promieniowanie UV.

Technologia geour, znana na świecie od ponad pół wieku, coraz częściej zaczyna być także stosowana w Polsce. Biorąc pod uwagę dotychczasowe dość skromne doświadczenia krajowe, zachodzi pilna potrzeba pogłębienia wiedzy z zakresu omawianego zagadnienia. Mając na uwadze powyższe względy, przeprowadzono polowe i laboratoryjne badania geotechniczne refulatu stanowiącego wypełnienie płaszczu geosyntetycznego. Pozyskany zbiór danych pozwoli na określenie jego parametrów oraz będzie podstawą do przeprowadzenia symulacji numerycznych konstrukcji w dalszym etapie prac. Uzyskane w toku analiz wyniki stanowią cenne uzupełnienie wiedzy dotyczącej możliwości zastosowania technologii geour w hydrotechnice.

MATERIAŁ I METODY

Proces instalacji i napełniania geoury

Instalację i napełnianie geoury zrealizowano na poligonie badawczym, umiejscowionym na brzegu Wisły, na terenie piaskarni Miejskiego Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji w Warszawie. Wspomniany poligon został zorganizowany przez Zakład Budownictwa Wodnego i Hydrauliki Politechniki Warszawskiej i Przedsiębiorstwa Realizacyjne INORA® sp. z o. o. przy współpracy z Instytutem Techniki Budowlanej w Warszawie oraz firm WICHARY Technologies sp. z o. o. oraz EFB Partner. Lokalizacja poligonu została dobrana w sposób zapewniający swobodny dostęp do koryta rzecznoego oraz możliwość wykorzystania sprzętu ciężkiego. Proces instalacji i napełniania geoury został podzielony na trzy fazy: przygotowanie platformy roboczej, przygotowanie płaszczu geosyntetycznego, napełnianie geoury z uwzględnieniem faz odsączania się refulatu.

Pierwszy etap prac terenowych obejmował odpowiednie przygotowanie podłoża pod planowaną do napełnienia geourę. Wyrównany za pomocą sprzętu ciężkiego fragment terenu (platforma robocza) został uformowany ze spadkiem w kierunku koryta Wisły tak, aby zapewnić sprawny i bezpieczny odpływ wody odsączającej się z napełnianej geoury. Na tym etapie rozplanowano i wykonano również system kanałów odpływowych na całej długości obwodu platformy roboczej. W celu zapobiegnięcia wymywaniu gruntu spod napełnianej geoury wykonano warstwę podkładową z geowłókniny, na której następnie równomiernie ułożono płaszcz geosyntetyku (rys. 1).



Rys. 1. Płaszcz geosyntetyczny i kominek

Fig. 1. Geosynthetic shell and chimney

Proces napełniania płaszcza geosyntetycznego refulatem jest zagadnieniem złożonym (Leshchinsky, Leshchinsky, Ling i Gilbert, 1996). Chcąc uniknąć nierównomiernych osiadań, lokalnej koncentracji refulowanego materiału lub stref rozluźnień, należało zapewnić stały nadzór doświadczonego pracownika i współpracę całego zespołu. Zgodnie z założeniami technologicznymi napełnianie georur odbywało się poprzez fabrycznie wszyte w płaszcz geosyntetyczny kominki (rys. 1).

Refulat tłoczony był do wnętrza georury przez system rurociągów podłączonych do wysokowydajnej pompy bagrowej zasilanej hydraulicznie za pośrednictwem koparki. Okresowo, zamiast mieszaniny wody z piaskiem, tłoczono samą wodę, co ograniczało ryzyko zapchania się całej instalacji. Pomimo korzystania z rur wyposażonych w szybkozłącza wystąpienie zatoru zauważalnie komplikowało cały proces i obniżało jego efektywność. Chcąc uzyskać równomierne napełnianie georur, regularnie przepinano rurociąg tłoczny pomiędzy poszczególnymi kominkami. Dodatkowo kierunek wypływu strugi podlegał regulacji za pomocą głowicy obrotowej (rys. 2). Refulat do wnętrza georur tłoczony był cyklicznie, z przerwami pozwalającymi na swobodne odsączenie się wody, co było możliwe dzięki wodoprzepuszczalności wykorzystanych materiałów geosyntetycznych, cechujących się dodatkowo odpowiednio dobranym wymiarem porów O_{90} w celu uniemożliwienia wynoszenia na zewnątrz drobnych frakcji gruntowych (Pilch, 2013).



Rys. 2. Pompa bagrowa i głowica podłączona do kominka

Fig. 2. Pump and filling head connected to chimney

Proces okresowego tłoczenia refulatu przedzielony fazami odsączenia kontynuowany był aż do całkowitego napełnienia georur refulatem, o czym świadczył intensywny wypływ pompowanej mieszaniny z kominków. W trakcie zrealizowanych prac napełniono 2 georury o zróżnicowanych wymiarach i parametrach płaszcza geosyntetycznego. W artykule zaprezentowano wybrane wyniki dotyczące równomiernie napełnionej „większej” georury o wymiarach w planie 15×3 m i wysokości po napełnieniu około 1,1–1,4 m.

Badania polowe

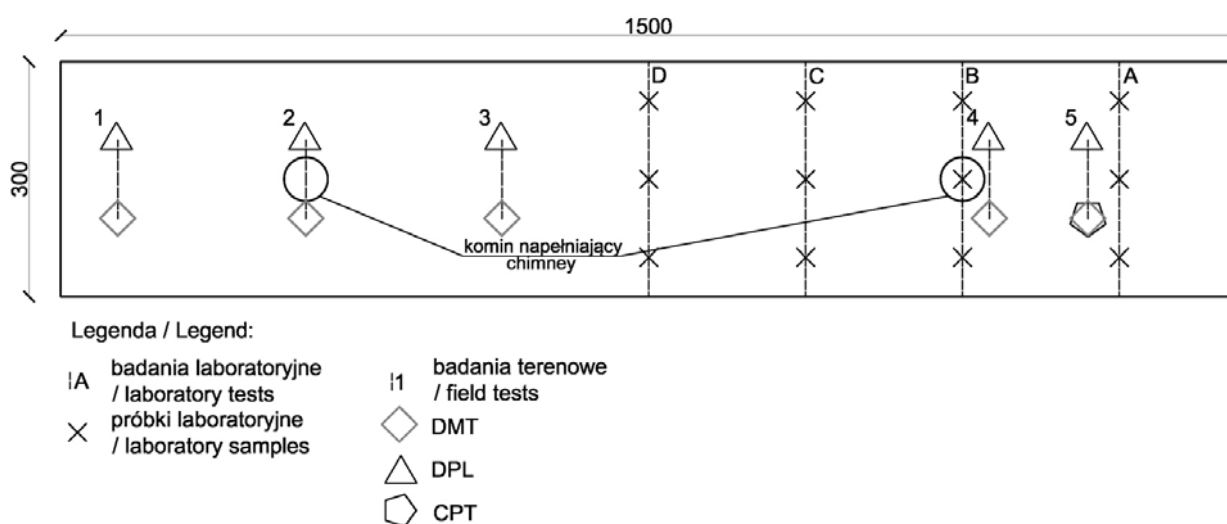
Badania polowe zrealizowano przy współpracy z Instytutem Techniki Budowlanej w Warszawie, który dysponuje specjalistyczną aparaturą badawczą (rys. 3). Główne badania obejmowały swym zakresem: sondowania dynamiczne sondą lekką (DPL), sondowania statyczne CPTU, badania dylatometrem płaskim (DMT).

Lokalizacja poszczególnych punktów badawczych (przekroje 1–5 dla badań polowych i A–D dla przekrojów pomiarowych dla badań laboratoryjnych) wraz z rodzajem wykonanych badań została przedstawiona na rysunku 4. Pomiaru rozplanowane zostały w sposób zapobiegający wzajemnym, potencjalnie niekorzystnym interakcjom stosowanych metod badawczych. Pewnym ograniczeniem była nietypowa geometria analizowanych obiektów i konieczne do zachowania względy bezpieczeństwa przy wykonywaniu pomiarów.



Rys. 3. Badania polowe na poligonie badawczym

Fig. 3. Field tests on experimental plot



Rys. 4. Geoura – schemat badań polowych oraz lokalizacja przekrojów pomiarowych dla badań laboratoryjnych

Fig. 4. Geotube – field tests scheme and the location of the measurement sections for laboratory tests

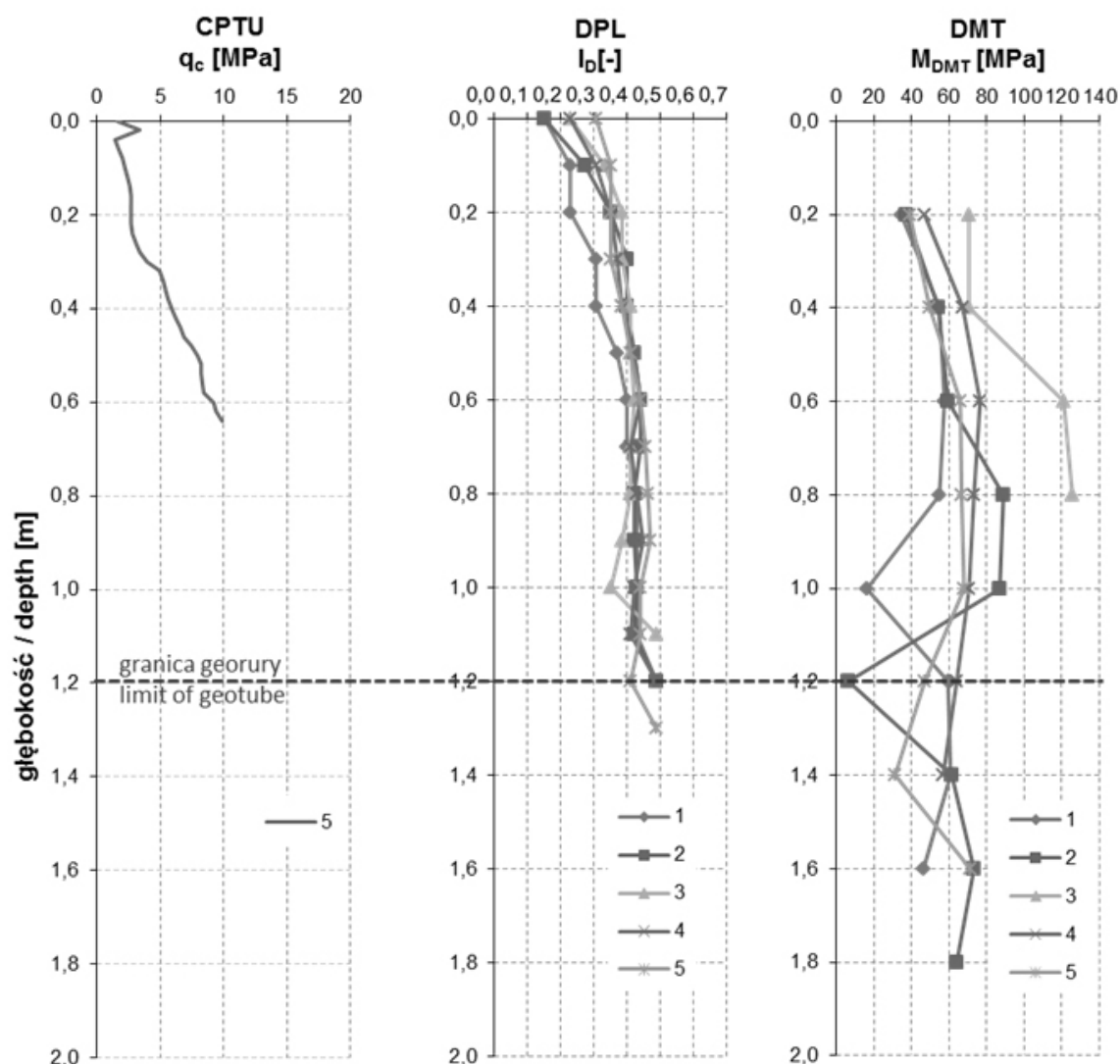
Rozmieszczenie badań wynikało z ograniczeń technicznych dla stosowanego urządzenia wielofunkcyjnego oraz możliwości manewrowania i bezpiecznego wykonywania pomiarów w czasie przemieszczania się po powierzchni geoury. Starano się zachować powiązanie z późniejszym rozmieszczeniem przekrojów pomiarowych dla badań laboratoryjnych (po rozcięciu geoury), jednak nie było to możliwe w każdym przypadku.

Na podstawie sondowań DPL wyznaczono wartości stopnia zagęszczenia gruntu (I_D). Na podstawie krzywej przesiewu (patrz rys. 7) ustalono, że analizowane grunty charakteryzują się niskim współczynnikiem jednorodności ($C_U \leq 3$). Dlatego do interpretacji stopnia zagęszczenia zastosowano wzór, który uwzględnia złe wysortowanie materiału według normy PN-EN 1997-2:2008, gdzie w załączniku G podano wzory zaczerpnięte z norm niemieckich:

$$I_D = 0,26 \log N_{10} + 0,15 \quad U \leq 3, \text{ powyżej z.w.g.}$$

Przyjęto wzór dla gruntów powyżej zwierciadła wód gruntowych, ponieważ badania wykonywano po odsączeniu georury, nie stosowano też w interpretacji zagęszczenia korekty na tzw. głębokość krytyczną (poniżej której nie dochodzi do wypierania gruntu w sondowaniach dynamicznych), ponieważ sondowania były wykonywane w osłonie geosyntetyku, który skutecznie zapobiegał temu zjawisku.

Z badań CPTU uzyskano wartość oporu stożka (q_c), jednak z powodu braku możliwości kotwienia penetrometru dla analizowanej georury wykonano tylko jedno sondowanie. Sondowania dylatometryczne (DMT) wykorzystano głównie do wyznaczenia modułu dylatometrycznego (M_{DMT}), odpowiadającego modułowi odkształcenia gruntu w zakresie średnich odkształceń (<0,1%). Do interpretacji modułu z pomiarów DMT stosowano zależności podane przez Marchettiego, Monaco, Totaniego i Calabrese (2001), mając na uwadze zebrane już doświadczenia (Godlewski, 2013), potwierdzające dobre wykalibrowanie tego urządzenia dla typowych gruntów w Polsce. Zbiorcze zestawienie uzyskanych wyników badań przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Georura – zestawienie wyników przeprowadzonych badań terenowych

Fig. 5. Geotube – results of field tests

Na podstawie uzyskanych danych można stwierdzić nierównomierny rozkład poszczególnych parametrów wraz z głębokością. Niemniej uzyskane wartości mieszczą się w przedziale charakterystycznym dla materiału pochodzenia rzecznoego, o dużej równoziarności i dobrym obtoczeniu ziaren. Charakterystyczne są tu zmniejszone w stosunku do utworów wodnolodowcowych wartości modułów mierzone w piaskach rzecznych, co ma potwierdzenie w wynikach na innych poligonach (Godlewski, 2013) i obserwacjach osiadań na obiektach. Lokalnie występują strefy charakteryzujące się mniejszym zagęszczeniem, co może świadczyć o wpływie technologii napełniania geoury (np. przerwy technologiczne związane z przepinaniem kominków) na jednorodność rozkładu parametrów.

Przeprowadzone badania miały na celu określenie charakterystyki materiału wypełniającego oraz jego zmienności przestrzennej, celem badań nie było poszukiwanie zależności wzajemnych. Jako efekt obrazujący zmienność właściwości w profilu podano bezpośrednie wartości rejestrowanych oporów dla poszczególnych końcówek. Interpretacja na tym etapie wymaga powiązania z wynikami badań laboratoryjnych (w trakcie). Należy zauważyć, że wykorzystane metody charakteryzują się nie tylko odmienną techniką pogrążania określonych końcówek, ale i różną rozdzielczością rejestrowanych danych (badania DMT to pomiary co 20 cm, sonda DPL – co 10 cm, a CPTU – co 2 cm), co biorąc pod uwagę charakter poznawczy prowadzonych na tym etapie prac, było w pełni uzasadnione. Ma to też potwierdzenie w przebiegu poszczególnych badań: od bardzo monotonnego przebiegu w wynikach sondy dynamicznej do nieco większej zmienności w sondowaniach CPTU czy DMT. Nie bez znaczenia jest tu też wpływ sposobu pogrążania końcówek w poszczególnych badaniach – dynamiczne i statyczne. Duże rozbieżności w badaniach DMT należy wiązać z kierunkowością badania i zorientowaniem poziomo „pracującej” membrany w kierunku ścianki geoury.

Badania laboratoryjne

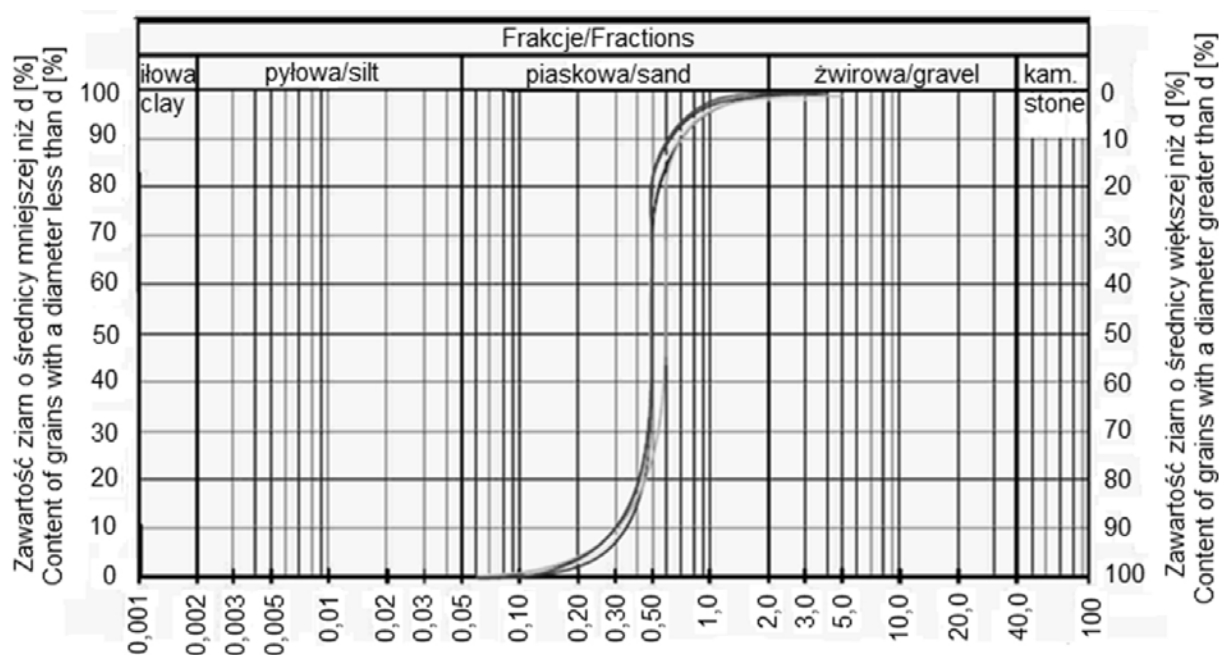
Ważnym uzupełnieniem badań polowych są badania laboratoryjne, stanowiące konieczny element weryfikacyjny. Z poszczególnych przekrojów pomiarowych A, B, C, D (rys. 4), wyznaczonych w obrębie geoury w sąsiedztwie wykonanych badań penetracyjnych, pobrane zostały próbki do badań laboratoryjnych (rys. 6). Po przecięciu geosyntetycznego płaszcza z każdego przekroju pobrano po 12 próbek z różnych rzędnych, tj. około 0,2, 0,5, 0,8 i 1,1 m, licząc od górnej powierzchni napełnionej geoury. Na każdej rzędnej pobrano po 3 próbki, co łącznie dało 48 punktów. Poboru dokonano cylindrem Proctora o stałej objętości 1 dm³.



Rys. 6. Pobór próbek do badań laboratoryjnych

Fig. 6. Sampling for laboratory tests

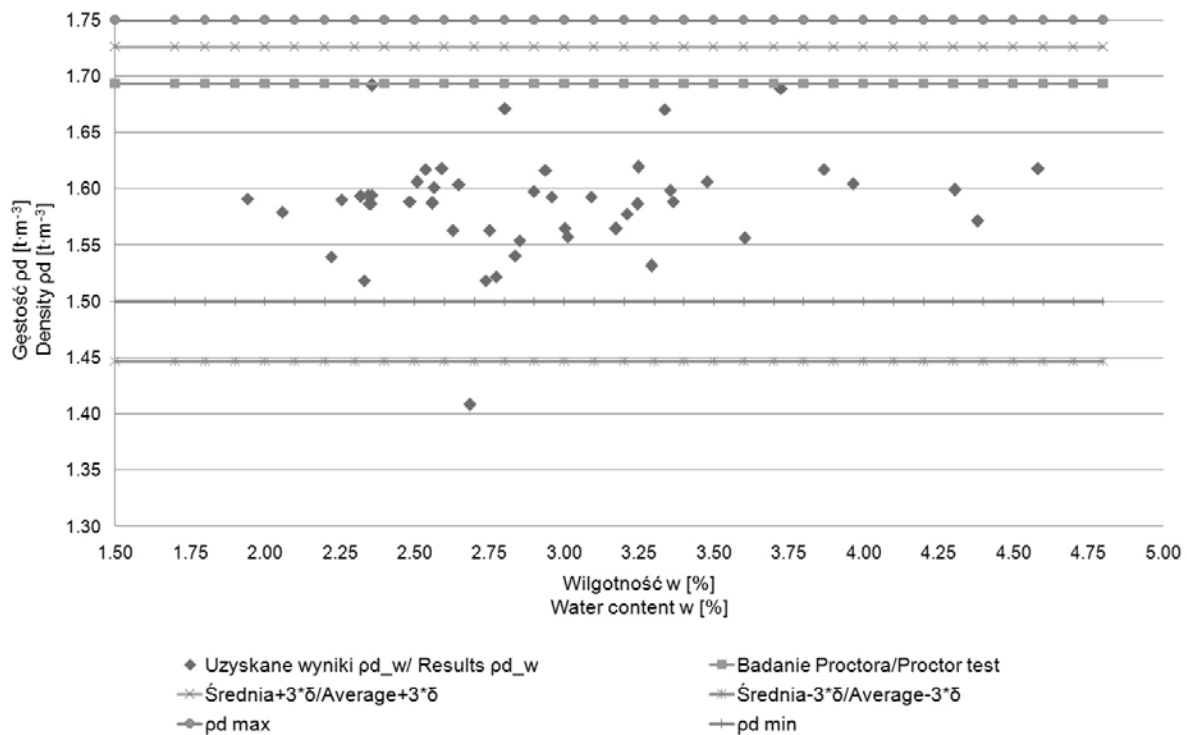
Badania laboratoryjne zostały przeprowadzone w laboratorium geotechnicznym na Wydziale Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej. Analiza sitowa pozwoliła określić rodzaj gruntu jako piasek drobny/średni (rys. 7).



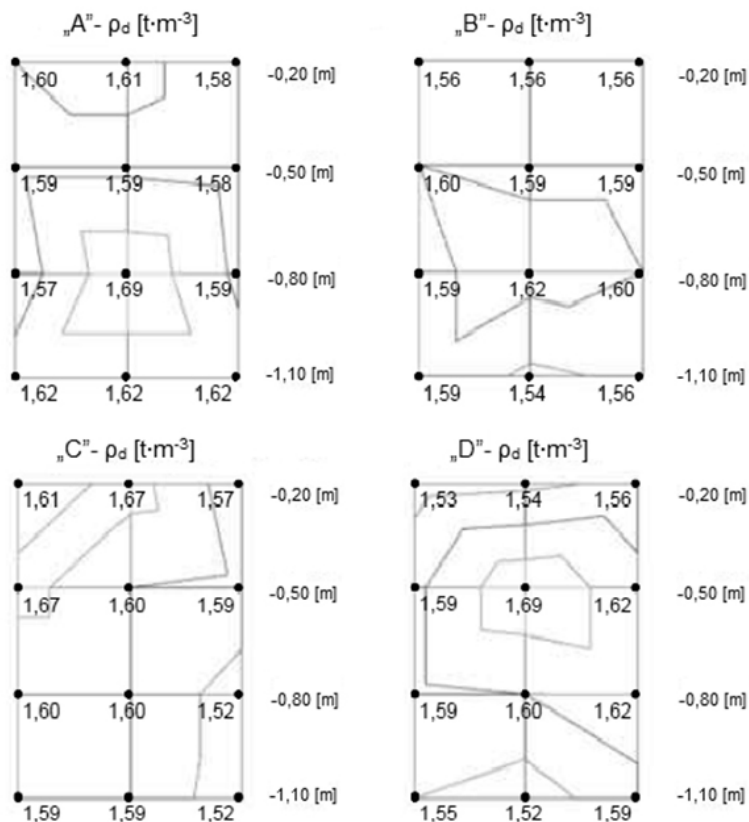
Rys. 7. Wyniki analizy sitowej
Fig. 7. Results of granulometric tests

Ekstremalne wartości parametrów opisujących zagęszczenie badanego gruntu zostały wyznaczone metodą widełek wibracyjnych. Wewnątrz geoury średnia wartość stopnia zagęszczenia gruntu (I_D) wynosi około 0,4. Zależność gęstości objętościowej szkieletu gruntowego od wilgotności zobrazowano na wykresie (rys. 8). Wątpliwości budzi tylko jeden pomiar, dla którego wyznaczona gęstość objętościowa szkieletu gruntowego okazała się mniejsza niż minimalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego. Pomiar ten może być obarczony „błędem grubym”, który mógł zaistnieć w trakcie poboru próbki. Uzyskane wyniki mieszczą się w granicach fizycznych i mogą zostać uznane za poprawne.

Na podstawie wykonanych oznaczeń wilgotności naturalnej i gęstości objętościowej wyznaczono rozkład gęstości objętościowej szkieletu gruntowego, który odznacza się dużą nierównomiernością (rys. 9). Na pokazanych rozkładach gęstości objętościowej w poszczególnych przekrojach pomiarowych można wskazać pewną powtarzalność rozprzestrzenienia – wyraźne obszary centralne o większym zagęszczeniu i mniejsze wartości w strefach brzeżnych. Ma to powiązanie z wynikami badań polowych, gdzie na początku i na końcu profilu rejestrowane są strefy „osłabień”. Ten układ wydaje się odzwierciedlać proces napełniania i zjawiska zachodzące w trakcie napełniania. W procesie zagęszczenia na skutek namywu hydraulicznego układ sił związany z kierunkiem filtracji działa koncentrycznie na zewnątrz. Analiza tego zjawiska będzie kontynuowana w symulacjach numerycznych uwzględniających modele z przepływem.



Rys. 8. Rozkład gęstości objętościowej szkieletu gruntowego w zależności od wilgotności
Fig. 8. Density distribution depending on water content



Rys. 9. Rozkład gęstości objętościowej szkieletu gruntowego w poszczególnych przekrojach
Fig. 9. Density distribution in sections

W tym celu niezbędne było wyznaczenie parametrów charakteryzujących właściwości mechaniczne analizowanego materiału wypełnienia geoury. Parametry wytrzymałościowe gruntu otrzymano w wyniku badań przeprowadzonych w aparacie bezpośredniego ścinania. Uzyskane wartości spójności i kąta tarcia wewnętrzznego zgadzają się z wartościami charakterystycznymi dla piasków drobnych i średnich (Wiłun, 2000). Analizie podlegały również wilgotność optymalna gruntu oraz maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego, określone z badań w aparacie Proctora (metoda I). Badania współczynnika filtracji wykonano metodą o zmiennym spadku hydraulicznym, posiłkując się dodatkowo danymi literaturowymi (Szymkiewicz i Kryczka, 2011). Przeprowadzone badania laboratoryjne wykonano zgodnie z normą PN-88/B-04481 i zaleceniami zawartymi w pracy Pisarczyka i Rymczy (1993). W tabeli 1 podsumowano dotychczas uzyskane wartości poszczególnych parametrów geotechnicznych uzyskanych z badań polowych i laboratoryjnych.

Tabela 1. Zestawienie oznaczonych parametrów geotechnicznych dla materiału wypełniającego geoury

Table 1. Summary of geotechnical parameters estimated for geotube filling material

Wyszczególnienie Specification	Badania polowe Field tests			Badania laboratoryjne Laboratory tests			
	DPL I_D [-]	DMT M_{DMT} [MPa]	ρ_d [t·m ⁻³]	I_D [-]	φ' [°]	c' [kPa]	k [m·s ⁻¹]
Badanie – Parametr Test – Parameter							
Wartość średnia Average value	0,40	47,0	1,59	0,40	36	~4	3·10 ⁻⁵

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Zrealizowane na poligonie badawczym prace oraz wykonane geotechniczne badania polowe i laboratoryjne pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. W wyniku napełnienia geoury refulatem zaobserwowano rozkład parametrów materiałowych refulatu w poszczególnych obszarach kontenera geosyntetycznego.
2. Wskutek procesów konsolidacji nastąpiło naturalne zagęszczenie gruntu stanowiącego wypełnienie geoury. Uzyskany stopień zagęszczenia ($I_D = 0,4 \pm 0,5$) pozwala określić stan gruntu jako średnio zagęszczony, co jest dobrym wynikiem w odniesieniu do materiału, jakim są równoziarniste piaski rzeczne.
3. Większe wartości stopnia zagęszczenia uzyskane z badań polowych mogą być wynikiem wzajemnej współpracy płaszcza geosyntetycznego i refulatu, przed jego rozcięciem w celu poboru próbek do badań laboratoryjnych. Wymaga to dalszych badań oraz uwzględniania tego zjawiska w analizach obliczeniowych.
4. Wyznaczony rozkład przestrzenny gęstości objętościowej szkieletu gruntowego odznacza się dużą niejednorodnością związaną najprawdopodobniej z odległością od kominka oraz od płaszcza geoury.
5. Fluktuacje i zaburzenia mogą wynikać ze zbyt małej liczby kominków w pozyskanym płaszczu geosyntetycznym, za których pośrednictwem realizowano proces napełniania.
6. Zrealizowany program badań polowych i laboratoryjnych jest cennym uzupełnieniem wiedzy w zakresie omawianego zagadnienia. Uzyskane wyniki mogą przyczynić się do zwiększenia zastosowania geosyntetycznych kontenerów w hydrotechnice.
7. Wymagane jest wykonanie dalszych badań oraz porównanie danych uzyskanych w wyniku zastosowania zróżnicowanych metod badawczych.

PIŚMIENICTWO

- Godlewski, T. (2013). Interpretacja badań polowych a Eurokod 7. *Acta Scientiarum Polonorum, Architectura*, 12 (3), 61–72.
- Leshchinsky, D., Leshchinsky, O., Ling, H. I. i Gilbert, P. A. (1996). Geosynthetic tubes for confining pressurized slurry: Some design aspects. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122 (8), 682–690.
- Marchetti, S., Monaco, P., Totani, G. i Calabrese, M. (2001). *The flat dilatometer test (DMT) in soil investigations*. International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE) TC16 Report; Bali: Proc. In situ.
- Pilarczyk, W. K. (2000). *Geosynthetics and Geosystems in Hydraulic and Coastal Engineering*. Rotterdam: A.A. Balkema.
- Pilch, M. (2013). Ochrona brzegów morskich georurą SoilTain na przykładzie zabezpieczenia wydmy w Rowach. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 4, 106–113.
- Pisarczyk, S. i Rymsza, B. (1993). *Badania laboratoryjne i polowe gruntów*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- PN-88/B-04481. Grunty budowlane. Badania próbek gruntu.
- PN-EN 1997-1 i 2:2008. Eurokod 7 – Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne. Część 2: Badania podłoża gruntowego.
- Popielski, P. (2017). Zastosowanie geosyntetyków w budownictwie wodnym. Seminarium hydrotechniczne. *Gospodarka Wodna*, 1, 33.
- Smoliński, B. (2016). Zastosowanie technologii geotub w budownictwie hydrotechnicznym. *Inżynieria Środowiska – Młodym Okiem*, 25, 282–302.
- Szymkiewicz, A. i Kryczka, A. (2011). Obliczanie współczynnika filtracji piasków i żwirów na podstawie krzywej uziarnienia: przegląd wzorów empirycznych. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 2, 110–121.
- Wiłun, Z. (2000). *Zarys geotechniki*. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności.

ANALYSIS OF THE GEOTUBES FILLING PROCESS BASED ON THE FIELD AND LABORATORY GEOTECHNICAL TESTS

ABSTRACT

The article concerns the possibility of the use of geosynthetic materials in hydraulic engineering, with particular emphasis of geotextiles. The geotubes technology and their ability of practical application were shown. The paper also discusses the program of geotechnical field and laboratory tests which was carried out on the experimental plot located on the bank of the Vistula River in Warsaw. Important technical issues deriving from the installation and filling process of geotube were briefly discussed based on observations and experience. In relation to technology of geotubes, attempt of preliminary interpretation of obtained results was made.

Key words: geotubes, geosynthetics, hydrotechnics, geotechnics