

Oszacowanie czasu konsolidacji i osiadań konsolidacyjnych sztucznej wyspy na Zalewie Wiślanym

Zleceniodawca:

Skarb Państwa – reprezentowany przez dyrektora Urzędu Morskiego w Gdyni

Umowa nr: TI1-IG-381/73/635/425/18

Zleceniobiorca :

Instytut Budownictwa Wodnego Polskiej Akademii Nauk

Nr tematu: C2-22/2018

Wykonawcy zdania:

dr hab. inż. Waldemar Świdziński, prof. nadzw. IBW PAN

dr inż. Barbara Świłała

mgr inż. Marcin Smyczyński

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Świdziński', is written over a horizontal line.

Gdańsk, wrzesień 2018

Spis treści

1.	Wstęp	3
1.1	Podstawa realizacji pracy	3
1.2	Cel i zakres opracowania	3
1.3	Wykorzystane materiały	3
1.4	Opis projektowanej inwestycji	3
2.	Analiza dostępnych danych	4
3.	Metodyka obliczeń	6
4.	Wyniki obliczeń	8
5.	Podsumowanie	11
6.	Literatura	12

1. Wstęp

1.1 Podstawa realizacji pracy

Niniejsze opracowanie zostało zrealizowane zgodnie z umową nr TII-IG-381/73/635/425/18 (C2-22/2018) z dnia 11 września 2018 r. zawartą pomiędzy Skarbem Państwa – Dyrektorem Urzędu Morskiego w Gdyni a Instytutem Budownictwa Wodnego Polskiej Akademii Nauk w Gdańsku.

1.2 Cel i zakres opracowania

Przedmiotem pracy było oszacowanie czasu konsolidacji i wielkości osiadań, które wystąpią na sztucznej wyspie, która ma być wybudowana na Zalewie Wiślanym. Wyspa ta została zaprojektowana w ramach zadania budowy drogi wodnej do portu Elbląg i stanowić będzie pole refulacyjne na etapie budowy i użytkowania drogi wodnej prowadzącej z Zatoki Gdańskiej w kierunku Portu Gdańsk, [1].

1.3 Wykorzystane materiały

W niniejszym opracowaniu bazowano na projekcie budowlanym inwestycji o nazwie „Budowa drogi wodnej łączącej Zalew Wiślany z Zatoką Gdańską”, Tom XI – Sztuczna wyspa na Zalewie Wiślanym – pole refulacyjne, przygotowanym przez „PROJMORS” Biuro Projektów Budownictwa Morskiego Sp. z o.o. Wykorzystano również dokumentację geologiczno-inżynierską rejonu planowanej inwestycji wykonaną przez Przedsiębiorstwo Geologiczne „Geoprojekt Szczecin” Sp. z o.o.

1.4 Opis projektowanej inwestycji

Wyspa zaprojektowana została w kształcie elipsy o wymiarach osi 1932 m i 1192 m Jej całkowita powierzchnia wynosić będzie ok. 180 ha i zbudowana będzie z urobku pochodzącego z prac pogłębiarskich na torze wodnym na Mierzei Wiślanej, Zalewie Wiślanym i na rzece Elbląg, [1]. Woda pochodząca z urobku dostarczanego w postaci nawodnionej pulpy, odprowadzana będzie z wyspy przez specjalnie zaprojektowane odstojniki i przelewy. Wyspa stanowić będzie jednocześnie ostoję dla ptactwa wodnego, licznie występującego w rejonie Zalewu Wiślanego, którego obszar objęty jest programem NATURA 2000.

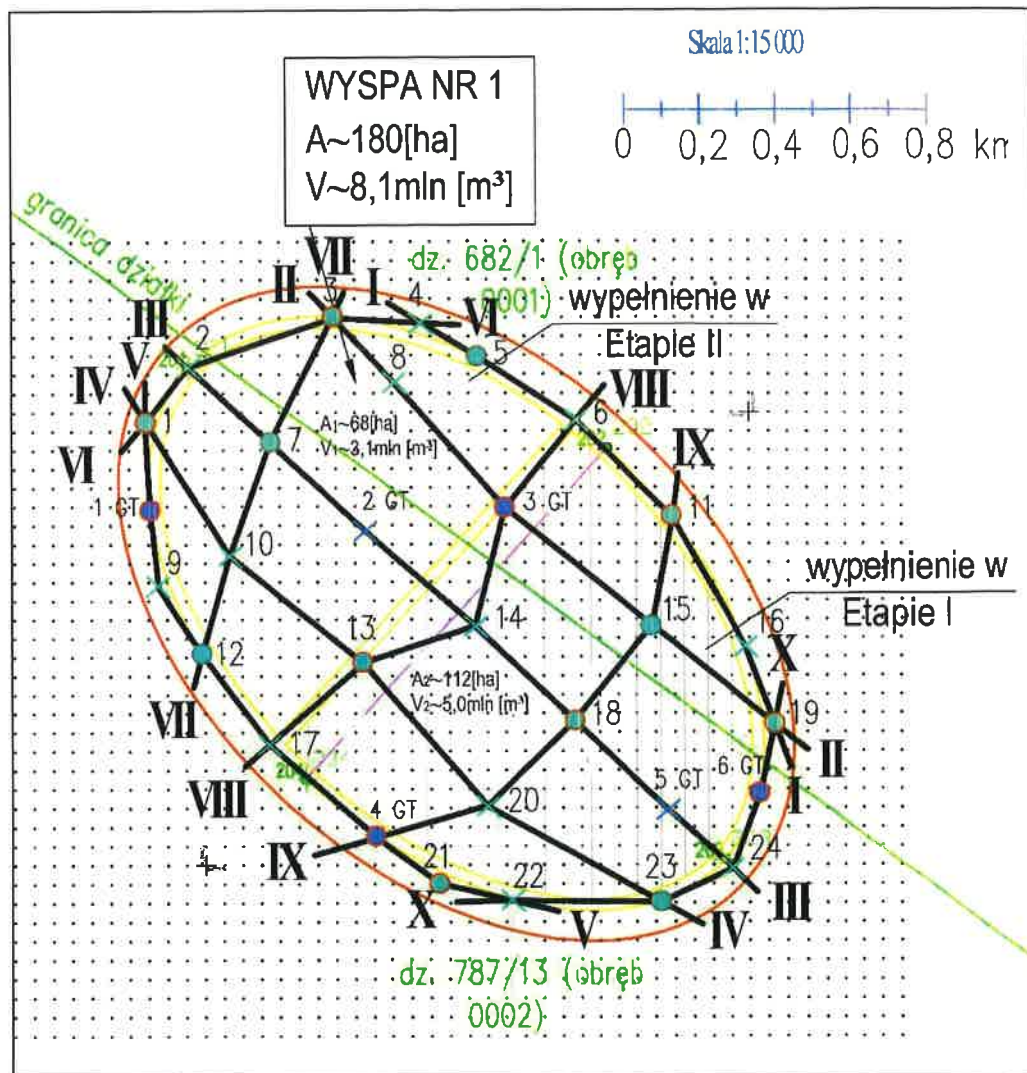
Dodatkowo, budowa wyspy ma na celu kompensację przyrodniczą strat środowiskowych wywołanych planowaną budową drogi wodnej. Konieczne będzie więc wykonanie na jej terenie nasadzeń lokalnej roślinności oraz jej pielęgnacja (szczególnie w początkowej fazie wzrostu). W związku z tym należy oszacować czas, po którym możliwe będzie bezpieczne

wejście na powierzchnię wyspy osoby, która wykonywać będzie wymienione wyżej prace. Wiąże się to z oszacowaniem czasu konsolidacji refulatu wypełniającego wyspę oraz obciążonego nim naturalnego dna.

2. Analiza dostępnych danych

Przedsiębiorstwo Geologiczne „Geoprojekt Szczecin” Sp. z o.o. przeprowadziło rozpoznanie warunków gruntowych w rejonie projektowanej inwestycji. W tym celu dokonano szeregu wierceń geologiczno-inżynierskich. W wybranych punktach dokonano ścięcia gruntu sondą SLVT a w innych sondowania sondą dynamiczną DPM/DPH. Zamawiający udostępnił Wykonawcy cechy fizyczne oraz parametry geotechniczne gruntu pochodzącego z czterech otworów znajdujących się w obrębie planowanej wyspy. Obejmowały one m.in. współczynnik filtracji, moduły edometryczne ścisłości pierwotnej, spójność, kąt tarcia wewnętrznego. Dokumentacja przekazana Wykonawcy zawierała dodatkowo profile trzech przekrojów geologicznych, na podstawie których możliwy był dobór właściwej geometrii analizowanego zadania. Schemat projektowanej wyspy wraz z lokalizacją otworów badawczych oraz przekrojów geologicznych przedstawiony jest na Rys. 1

Warunki gruntowe panujące w rejonie inwestycji są niekorzystne. W dnio zalegają grunty organiczne, tj. namuły o dużych miąższościach, posiadające niskie współczynniki filtracji (rzędu 10^{-8} , 10^{-9} m/s) oraz bardzo niskie moduły odkształcenia. Parametry te odgrywają kluczową rolę w obliczeniach konsolidacji i wielkości osiadań. Z uwagi na fakt, iż Wykonawca nie dysponuje badaniami dedykowanymi niniejszej pracy, konieczne było posiłkowanie się dostępnymi informacjami. Niestety, badania cech mechanicznych gruntów organicznych wiążą się z wieloma trudnościami, dlatego też wartości modułów edometrycznych, dostępnych w przekazanych materiałach, nie są całkowicie miarodajne. Szczególną uwagę należy zwrócić na fakt, iż w przypadku niektórych otworów, moduły edometryczne dla tego samego gruntu na zmianę zwiększają się i zmniejszają przy rosnących zakresach obciążeń, co nie jest poprawne. W prawidłowo wykonanych badaniach moduły charakteryzujące ten sam materiał powinny zwiększać się wraz z przyrostem naprężeń. W związku z tym, że obliczenia czasu konsolidacji i wielkości osiadań są bardzo wrażliwe na zmianę tych parametrów, należy podkreślić, że niniejsze opracowanie ma jedynie charakter szacunkowy i dane w nim zawarte nie mogą być traktowane jako reprezentatywne.

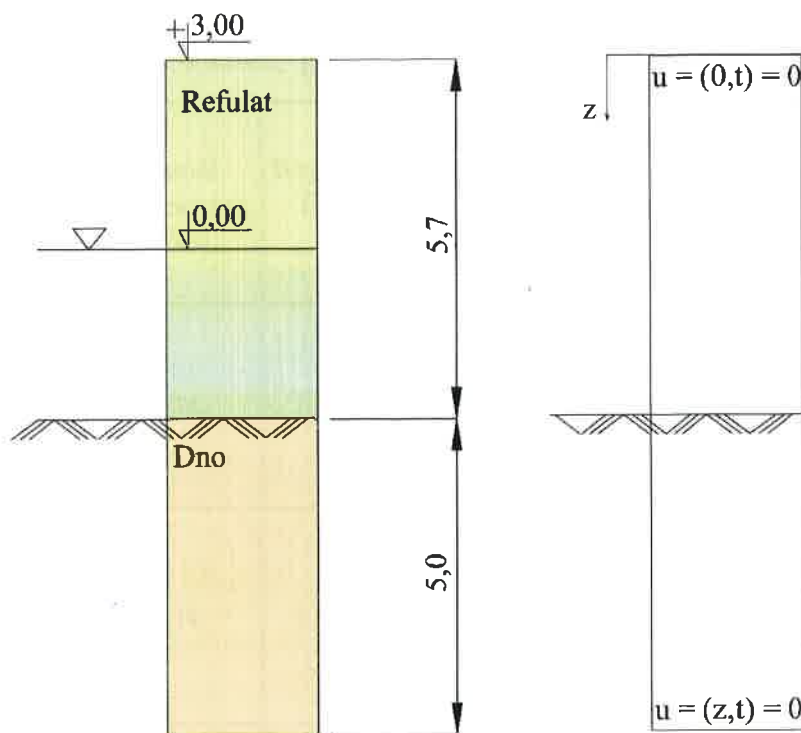


Rys. 1 Schemat projektowanej wyspy

Sztuczna wyspa będzie ograniczona groblą wykonana z dwóch rzędów geotub oraz piaszczystego wypełnienia pomiędzy nimi. Do tego celu zostanie wykorzystany materiał pozyskany z przekopu przez mierzęję. Po wykonaniu grobli, projektowana sztuczna wyspa ma zostać wypełniona urobkiem pochodzącym z pogłębiania torów wodnych na Zalewie Wiślanym oraz rzece Elbląg. W związku z tym, że w dnie Zalewu zalegają namuły, będą one stanowić równocześnie wypełnienie wyspy. Jednak z uwagi na zmienność parametrów tych gruntów w poszczególnych punktach, w których przeprowadzono badania, nie jest możliwe jednoznaczne określenie cech fizycznych oraz parametrów geotechnicznych refulatu. Co więcej, będzie to mieszanina różnych gruntów, mogących mieć skrajnie różne współczynniki filtracji i moduły edometryczne (np. mieszanina piasku z namulem). W związku z tym, oszacowanie czasu konsolidacji i wielkości osiadań gruntu narefulowanego przeprowadzono zakładając różne warianty, opisane szczegółowo w kolejnym rozdziale.

3. Metodyka obliczeń

Obliczenia konsolidacji przeprowadzono w punkcie zlokalizowanym w środku wyspy. Założono najbardziej niekorzystny wariant, w którym miąższość namułu poddanego konsolidacji jest największa. W związku z tym geometrię do obliczeń przyjęto wykorzystując dane z otworu 4GT (Rys. 1), gdzie miąższość namułu w dnie wynosiła 5 m, a miąższość urobku koniecznego do narefulowania, tak aby wysokość wyspy wynosiła 3 m powyżej poziomu wody, to około 5,7 m. Schemat modelu przyjętego do obliczeń przedstawiono na Rys. 2.



Rys. 2 Geometria modelu oraz warunki brzegowe przyjęte do obliczeń

Przeanalizowano dostępne dane z wszystkich czterech otworów badawczych znajdujących się w obrębie projektowanej wyspy (otw. nr 4, 12, 18 i 19). Najbardziej niekorzystne warunki gruntowe rozpoznano w otworze nr 12 i takie przyjęto w modelu dla warstwy dna. W związku z tym, że nie są znane parametry refulatu, przeprowadzona została analiza wariantowa mająca na celu oszacowanie najbardziej niekorzystnych i korzystnych czasów konsolidacji i wielkości osiadań. Wybrano trzy zestawy parametrów odzwierciedlające najłabsze, pośrednie i najlepsze charakterystyki fizyczne potencjalnego refulatu bazując na danych z otworów nr 12, 19 i 4. W każdym z wariantów założono, że w dnie występuje namuł charakteryzujący się najniższymi modułami edometrycznymi oraz najniższym współczynnikiem filtracji (otw. nr 12).

Wzięto pod uwagę trzy warianty obliczeniowe:

- I. Słaby namuł w dnie oraz słaby grunt narefulowany – jednakowe parametry dla obu warstw, odpowiadające gruntowi z otworu nr 12,
- II. Słaby namuł w dnie (dane z otworu nr 12) oraz refulat o pośrednich parametrach (dane z otworu nr 19),
- III. Słaby namuł w dnie (dane z otworu nr 12) oraz refulat o najbardziej korzystnych parametrach (dane z otworu nr 4)

Parametry gruntów uwzględnione w obliczeniach czasu konsolidacji i osiadań przedstawiono w Tabeli 1.

Tabela 1 Parametry gruntu założone w poszczególnych wariantach

	Gęstość objętościowa ρ [t/m ³]	Współczynnik filtracji k [m/s]	Badanie edometryczne	
			Zakres obciążeń [kPa]	Edometryczny moduł ściśliwości pierwotnej M_0 [kPa]
Grunt rodzimy dna	1.34	1.45×10^{-9}	0-12.5	130.8
			12.5-25.0	127.7
			25.0-50.0	145.1
			50.0-100.0	346.9
			100.0-200.0	1069.5
Refulat	Wariant I 1.34	1.45×10^{-9}	0-12.5	130.8
			12.5-25.0	127.7
			25.0-50.0	145.1
			50.0-100.0	346.9
			100.0-200.0	1069.5
	Wariant II 1.50	1.83×10^{-8}	0-12.5	235.0
			12.5-25.0	816.2
			25.0-50.0	236.0
			50.0-100.0	333.7
			100.0-200.0	2075.1
	Wariant III 1.80	1.95×10^{-8}	0-12.5	350.6
			12.5-25.0	837.1
			25.0-50.0	1323.1
			50.0-100.0	1898.2
			100.0-200.0	5185.4

Obliczenia konsolidacji wykonano bazując na analitycznym rozwiązaniu równania różniczkowego drugiego rzędu, będącego podstawą teorii konsolidacji jednowymiarowej Terzagiego, [3,4]. Niezależnie, zagadnienie to rozwiązano numerycznie, stosując metodę

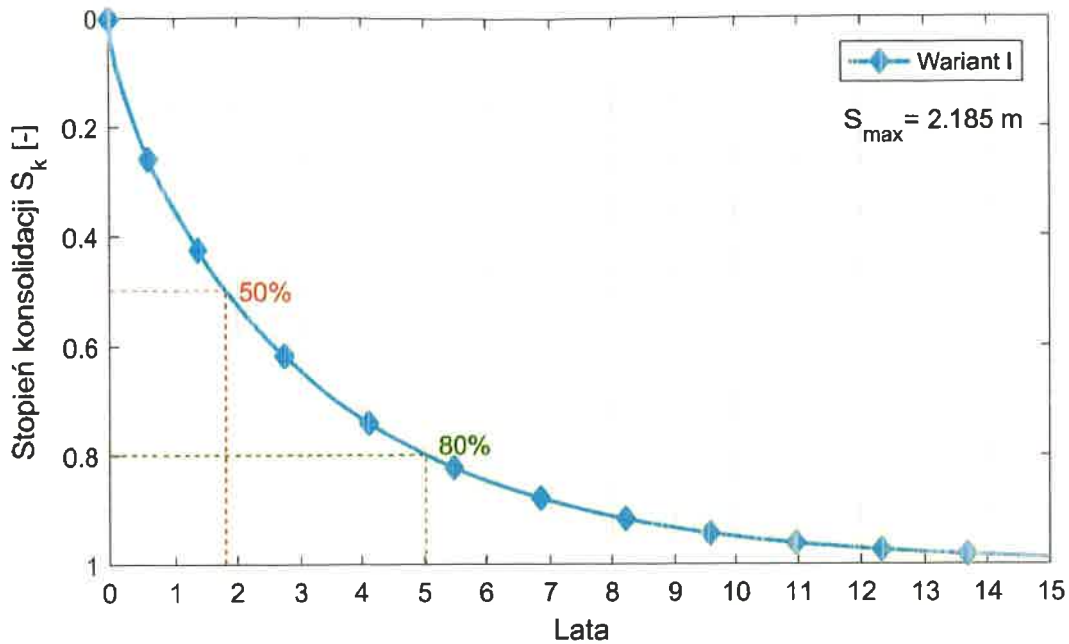
elementów skończonych. Założono, że konsolidacja warstwy narefulowanego namułu nastąpi pod wpływem ciężaru własnego i rozpocznie się po całkowitym spłynięciu nadmiaru wody. Natomiast warstwa rodzimego namułu znajdującego się w dnie ulegnie konsolidacji na skutek obciążenia urobkiem. Odpływ wody z gruntu organicznego możliwy będzie do przepuszczalnego piasku drobnego znajdującego się poniżej warstwy namułu. Warunki brzegowe przyjęte w modelu przedstawione są na Rys. 2. Przeprowadzone analizy numeryczne potwierdzają słuszność przyjętych w modelu założeń. Całkowita wielkość wymodelowanych obliczonych osiadań zależna jest w największym stopniu od naprężeń pionowych panujących w gruncie oraz od jego modułów edometrycznych. Im wyższy moduł, tym mniejsze osiadania. Wyniki przeprowadzonych obliczeń dla wszystkich rozważanych wariantów przedstawione są w kolejnym rozdziale.

4. Wyniki obliczeń

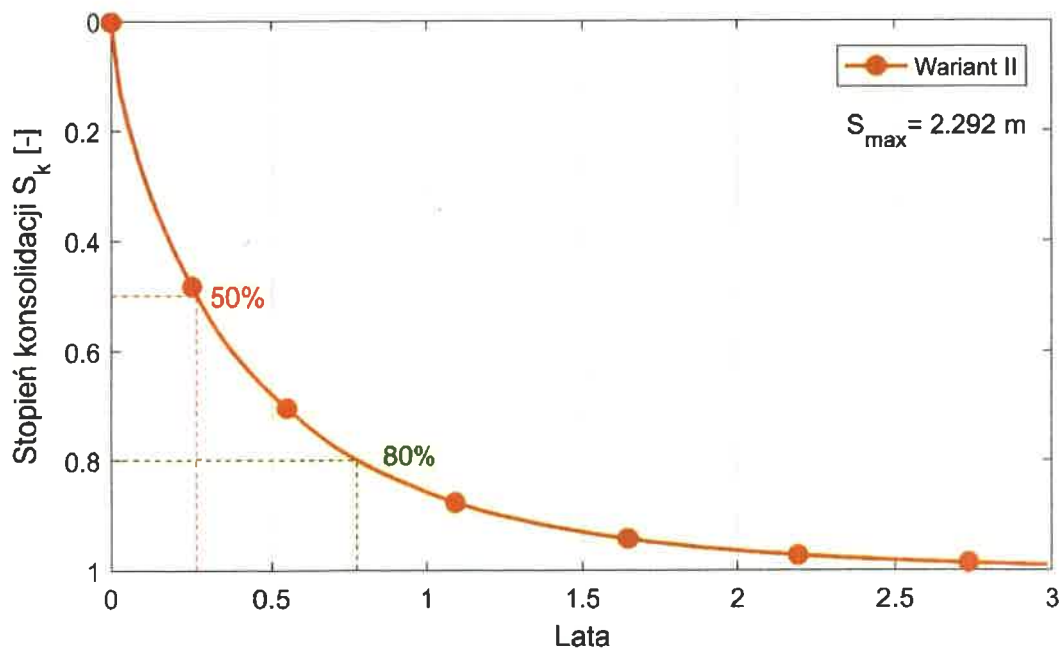
Przeprowadzone obliczenia wykazały, że bardzo duży wpływ na czas konsolidacji ma współczynnik filtracji gruntu oraz edometryczne moduły ścisłości pierwotnej. Dlatego bardzo istotnym jest jakie parametry będzie miał narefulowany wewnątrz wyspy urobek. Wariant I odpowiada najbardziej niekorzystnemu przypadkowi, kiedy obie warstwy modelu, tj. grunt rodzimy znajdujący się w dnie oraz refulat będą zbudowane z bardzo słabych namułów, charakteryzujących się niskim współczynnikiem filtracji i niskimi modułami edometrycznymi. Konsolidacja gruntu w czasie wyrażona jest poprzez bezwymiarowy stopień konsolidacji S_k , będący stosunkiem aktualnych do całkowitych osiadań. Rys. 3 przedstawia wyniki obliczeń otrzymane dla wariantu I.

Analizując Rys. 3 można zauważyć, że konsolidacja gruntu dla wariantu I jest procesem długotrwałym. Maksymalne osiadania zostaną osiągnięte po około 20 latach. Warto podkreślić, że ich oszacowana wartość jest bardzo duża i wynosi ok. 2.2 m. Jednak już w ciągu pierwszych 5 lat osiągnięte zostanie, aż 80% całkowitych osiadań.

Wariant II odpowiada przypadkowi pośredniemu, kiedy dno zbudowane jest ze słabego gruntu, natomiast refulat z namułu o nieco lepszych parametrach niż w przypadku wariantu I. Pomimo, że założone moduły edometryczne potencjalnego urobku są podobne, zwiększenie współczynnika filtracji o jeden rząd wielkości skutkuje znacznym skróceniem całkowitego czasu konsolidacji. Rys. 4 przedstawia wyniki obliczeń otrzymane dla wariantu II.



Rys. 3 Konsolidacja gruntu w czasie dla wariantu I

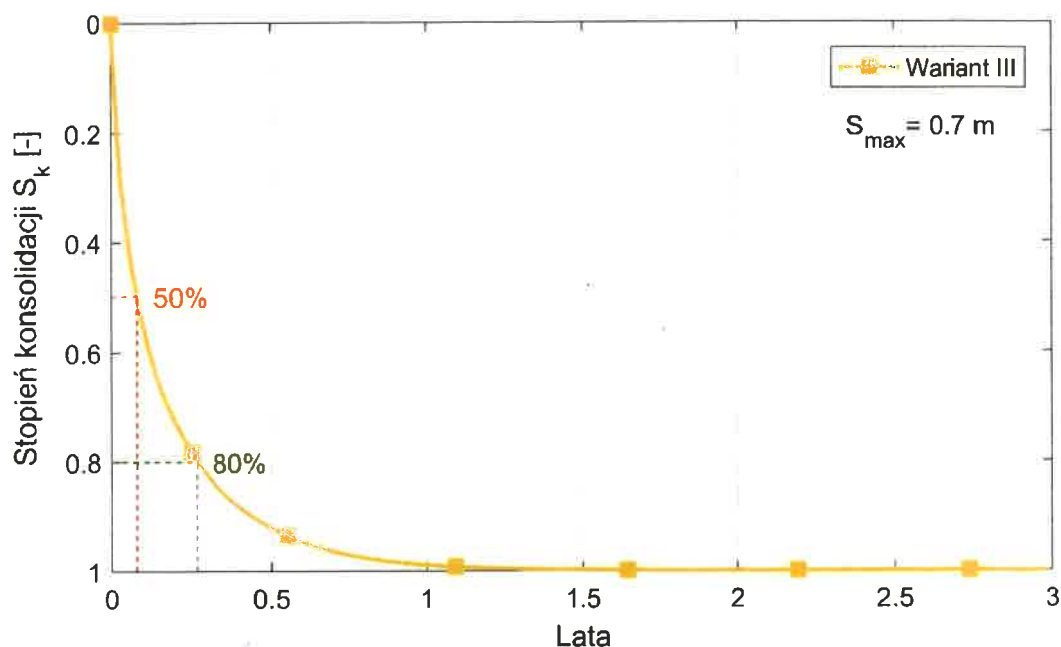


Rys. 4 Konsolidacja gruntu w czasie dla wariantu II

W przypadku wariantu II, szacowana konsolidacja gruntu w czasie przebiega zdecydowanie szybciej niż w przypadku poprzedniego wariantu. Maksymalne osiadania osiągnięte zostaną po ok. 3 latach. Również w tym wariantcie pozostaną one na bardzo wysokim poziomie (ok. 2.3 m). Jest to efektem niskich modułów edometrycznych gruntu i obciążeń wyższych niż w poprzednim przypadku, spowodowanych zwiększonym ciężarem

warstwy refulatu. Pomimo wyższych obciążeń, moduły edometryczne pozostają podobne jak w wariancie I.

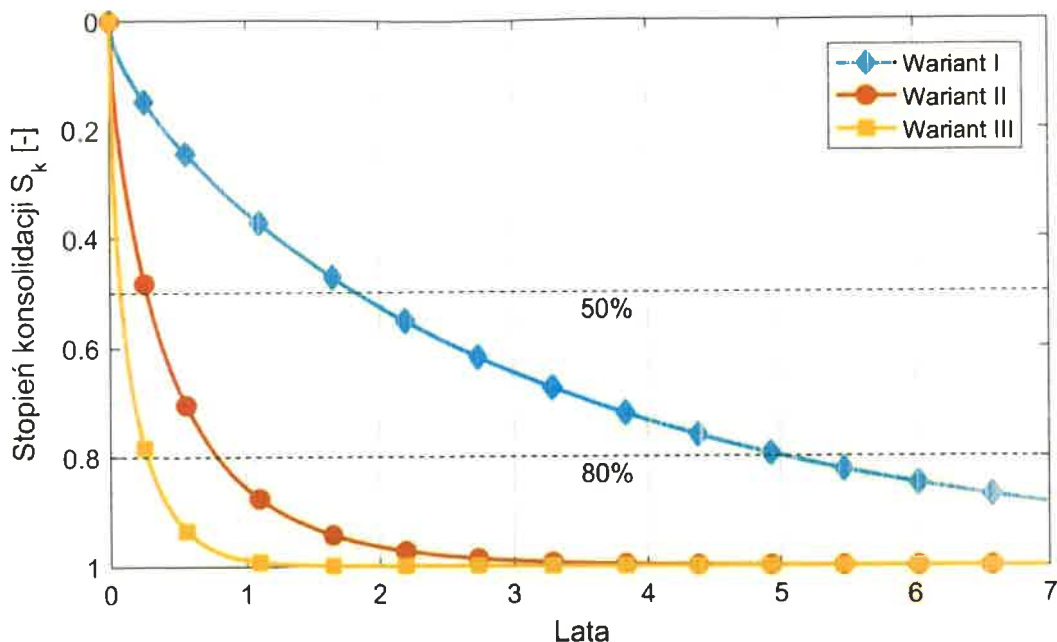
W kolejnym wariancie obliczeniowym rozważano możliwość wypełnienia wyspy refulatem o lepszych modułach edometrycznych, przy podobnej wartości współczynnika filtracji jak w wariancie II. Jest to zatem najbardziej korzystny przypadek zarówno z punktu widzenia czasu konsolidacji jak i wartości maksymalnych osiadań jej towarzyszących. Wyniki obliczeń dla wariantu III przedstawiono na Rys. 5.



Rys. 5 Konsolidacja gruntu w czasie dla wariantu III

Analizując wyniki otrzymane dla wariantu III można zauważyć, że szacowany czas, po którym nastąpi całkowita konsolidacja wyspy wynosi zaledwie 1.5 roku. Jest on o połowę krótszy niż w przypadku wariantu II oraz ponad 13 razy krótszy w porównaniu z wariantem I. Co więcej, oszacowane całkowite osiadania wyniosą 0.7 m. Jest to efektem wyższych modułów edometrycznych założonych dla urobku. Bardzo istotnym faktem jest, iż w tym przypadku większy ciężar gruntu, generujący wyższe naprężenia, powoduje iż zastosowanie mają korzystniejsze moduły ścisłości pierwotnej.

Porównanie wyników otrzymanych dla wszystkich rozważanych wariantów przedstawione jest na Rys. 6 i Tabela 2. Wskazuje ono jednoznacznie, że najbardziej korzystny jest wariant III, który zakłada, że urobek odkładany wewnątrz wyspy będzie miał nieco wyższe moduły edometryczne i współczynnik filtracji niż zakładane w wariantach I i II. Warto zauważyć, że to te dwa parametry w największym stopniu decydują o czasie konsolidacji i wartości maksymalnych osiadań.



Rys. 6 Porównanie konsolidacji gruntu w czasie dla wszystkich wariantów

Tabela 2 Zestawienie czasu konsolidacji i wielkości osiadań dla wszystkich wariantów.

	Wariant I	Wariant II	Wariant III
Całkowite osiadania [m]	2.2	2.3	0.7
100% osiadań [lata]	20.0	3.0	1.5
80% osiadań [lata]	5.0	0.8	0.4
50% osiadań [lata]	1.8	0.3	0.1

5. Podsumowanie

Przedstawione w niniejszym raporcie wyniki obliczeń czasu konsolidacji i wielkości osiadań sztucznej wyspy projektowanej na Zalewie Wiślanym mają charakter szacunkowy. Ze względu na fakt, iż niemożliwe jest określenie na tym etapie parametrów urobku, który znajdzie się wewnątrz sztucznej wyspy, przeprowadzono analizę, w której rozważano trzy warianty. We wszystkich przypadkach założono, że grunt rodzimy znajdujący się w dnie ma najbardziej niekorzystne parametry spośród tych udokumentowanych wynikami badań. Parametry refulatu natomiast, różnicowane są w poszczególnych wariantach tak, aby określić podatność rozwiązania na wartości edometrycznych modułów ścisłości pierwotnej oraz współczynnika filtracji. Najbardziej niekorzystnym jest wariant I, w którym parametry refulatu

i dna są jednakowe. Zaobserwowano, że zmiana współczynnika filtracji o jeden rząd wielkości powoduje znaczne skrócenie maksymalnego czasu konsolidacji, nie wpływając jednak na redukcję maksymalnych osiadań (wariant II). Jednakże przyjęcie do obliczeń gruntu o wyższym współczynniku filtracji i modułach edometrycznych skutkuje zarówno skróceniem czasu konsolidacji jak i zmniejszeniem maksymalnej wartości osiadań.

W związku z brakiem danych i parametrów dedykowanych niniejszej pracy, konieczne było posiłkowanie się dostępnymi badaniami, które nie zawsze jednak poprawnie odwzorowują stan rzeczywisty. Zaleca się, aby po zakończeniu budowy sztucznej wyspy wykonać dodatkowe badania mające na celu identyfikację rzeczywistych parametrów narefulowanego urobku. Wtedy możliwe będzie bardziej dokładne określenie przewidywanego czasu konsolidacji i maksymalnej wartości osiadań.

Aby możliwe było jednak bezpieczne poruszanie się osoby pielęgnującej roślinność po wyspie, należy wziąć pod uwagę wiele dodatkowych czynników. Grunt, który znajdzie się wewnątrz wyspy będzie gruntem organicznym i nawet zakładając najbardziej korzystny wariant, będzie on posiadał bardzo niskie współczynniki filtracji. W okresach intensywnych opadów atmosferycznych oraz bezpośrednio po nich, namuł będzie ulegał znacznemu rozmiękczeniu w powierzchniowej warstwie, a jego niewielka sztywność wpłynie na zwiększenie ryzyka wystąpienia dodatkowych osiadań od przyłożonego ciężaru.

Z drugiej strony, pozytywny wpływ na czas konsolidacji i wielkość osiadań wyspy będzie miała zasadzona na jej powierzchni roślinność. Korzenie roślin pobierają bowiem wodę z gruntu, ułatwiając jej odprowadzenie, w procesie transpiracji, do atmosfery. Co więcej, rozwijające się systemy korzeniowe będą mechanicznie wzmacniać powierzchniową warstwę namułu, ułatwiając bezpieczne poruszanie się po wyspie.

6. Literatura

- [1] „PROJMORS” Biuro Projektów Budownictwa Morskiego Sp. z o.o. *Projekt Budowlany, Tom XI – Sztuczna wyspa na Zalewie Wiślanym - pole refulacyjne*. Kwiecień 2018.
- [2] Przedsiębiorstwo Geologiczne „Geoprojekt Szczecin” Sp. z o.o. *Budowa sztucznej wyspy na Zalewie Wiślanym – Dokumentacja geologiczno-inżynierska*. Grudzień 2017.
- [3] Terzaghi, K. *Theoretical soil mechanics*, John Wiley&Sons, Inc. 1943.
- [4] Wiłun, Z. *Zarys Geotechniki*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności WKŁ, Wydanie X, Warszawa 2013.