

# Analiza stateczności skarpy klifu w ciągu brzegu morskiego w miejscowości Rozewie



dr inż.

**WITOLD TISLER**

Politechnika Gdańska  
Wydział Inżynierii Lądowej  
i Środowiska

**ORCID: 0000-0003-1501-8097**



inż.

**WIKTORIA PAŁASZ**

Politechnika Gdańska  
Wydział Inżynierii Lądowej  
i Środowiska

**ORCID: 0009-0007-1273-3761**



inż.

**TOMASZ PIERZCHLIŃSKI**

Politechnika Gdańska  
Wydział Inżynierii Lądowej  
i Środowiska

**ORCID: 0009-0006-2693-4807**

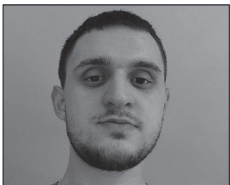


inż.

**NATALIA PIÓRKOWSKA**

Politechnika Gdańska  
Wydział Inżynierii Lądowej  
i Środowiska

**ORCID: 0009-0007-6766-4708**



inż.

**KACPER SZULC**

Politechnika Gdańska  
Wydział Inżynierii Lądowej  
i Środowiska

**ORCID: 0009-0003-5852-2063**

W opracowaniu przedstawiono wariantową analizę stateczności wykonaną dla klifu znajdującego się w miejscowości Rozewie. Na zbiegu z uwagi na gęstą roślinność oraz wysokie nachylenie zachodzą procesy osuwiskowe i wymaga ono wzmocnienia.

W porównaniu przeprowadzonych analiz szczególną uwagę zwrócono na sposób modelowania poziomu wody gruntowej oraz wartości parametrów przyjmowanych dla modelu van Genuchtena, odpowiedzialnego za analizę przepływu w strefie nienasyconej.

Ruchy mas ziemnych to proces polegający na gwałtownym przemieszczaniu się materiału gruntowego wzdłuż określonej powierzchni poślizgu. Przebiegają one pod wpływem sił ciężkości przy przekroczeniu granicy wytrzymałości na ścinanie ośrodka gruntowego [1]. Zaliczamy do nich osuwiska, zsuwy oraz sptywy. Najbardziej powszechnym problemem są pierwsze z nich. Ministerstwo Klimatu i Środowiska podaje, że w Polsce wyróżniamy trzy zasadnicze źródła osuwisk: rzeźba terenu w połączeniu z budową geologiczną podłoża, intensywność opadów atmosferycznych oraz działalność człowieka [1]. Przyczyny osuwisk można zatem podzielić na antropogeniczne oraz naturalne, do których należą również zjawiska związane z topnieniem śniegu, wietrzeniem skał, podmywaniem podstawy zbocza przez rzekę lub morze. W Polsce najczęściej osuwisk uaktywnia się wiosną, gdy na skutek roztopów i ulewnych opadów deszczu grunt nasącza się i następuje podwyższenie poziomu wód gruntowych. Największa liczba osuwisk występuje na terenie Karpat i stanowi ponad 90%



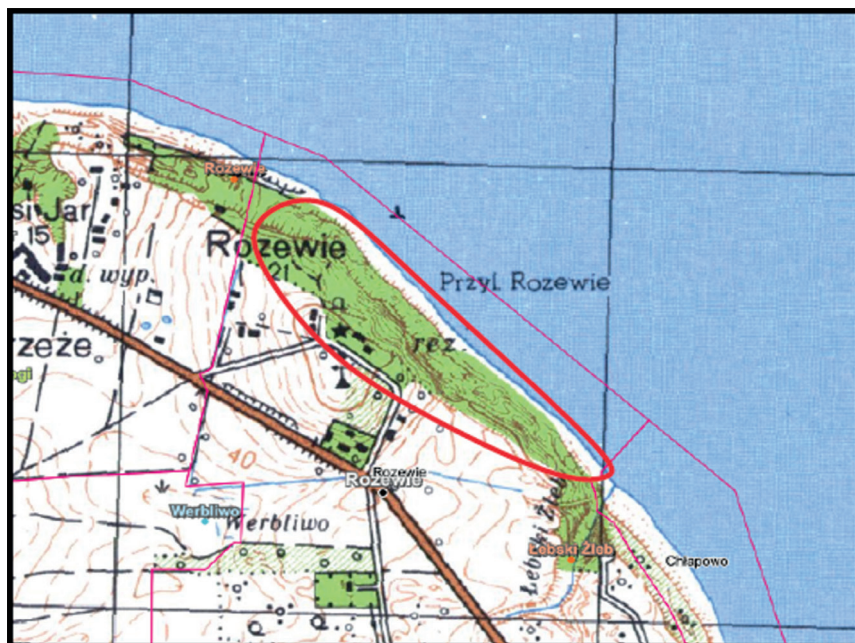
wszystkich znajdujących się w naszym kraju. Pozostałą część obszarów niebezpiecznych stanowią wybrzeża klifowe w strefie brzegowej Bałtyku oraz dolina rzeki Wisły [2].

Jednym z przykładów osuwisk znajdujących się na terenie północnej Polski jest klif w miejscowości Rozewie. Z uwagi na obfitą roślinność, złożony układ warstw geotechnicznych oraz wysoki poziom wód gruntowych, który miejscami objawia się wysiękami, zbrocze osuwa się i może wymagać wzmocnienia. W niniejszym artykule przeanalizowano stateczność klifu oraz wykonując wariantową analizę, sprawdzono wpływ kluczowych założeń przyjmowanych na etapie tworzenia modelu, takich jak parametry krzywej retencji czy sposób przyjmowania filtracyjnych warunków brzegowych.

### Lokalizacja oraz warunki gruntowo-wodne

Miejscowość, w której znajduje się klif, zlokalizowana jest na terenie gminy Władysławowo w powiecie puckim (województwo pomorskie). Analizowany obszar zaznaczono na rys. 1. Od strony północnej teren umocniony jest przez opaskę betonową, której celem jest ograniczenie wpływu falowania Morza Bałtyckiego na klif [3]. Strona południowa to działki, na których występują tereny gospodarcze, mieszkalne oraz latarnia morska. Teren położony jest na wysokości lekko falistej, która opada ku morzu stromym zboczem o wysokości około 50 m. Na obszarze nie stwierdzono występowania stałych sieci rzecznych [4]. Analizowany obszar jest niezabudowany, porośnięty lasem oraz roślinnością krzewiastą i wodolubną, a w dodatku nie jest uzbrojony. Klif od 1959 r. objęty jest krajobrazowym rezerwatem Przylądek Rozewski, na terenie którego chronione są ponad dwustuletnie drzewa bukowe.

Geologię zbrocza opisuje dokumentacja geologiczno-inżynierska (DGI) z 2022 r. [4]. W dokumencie przedstawiono cztery przekroje poprzeczne przez skarpe. Budowa



Rys. 1. Mapa topograficzna Polski, miejscowość Rozewie; źródło: [4]

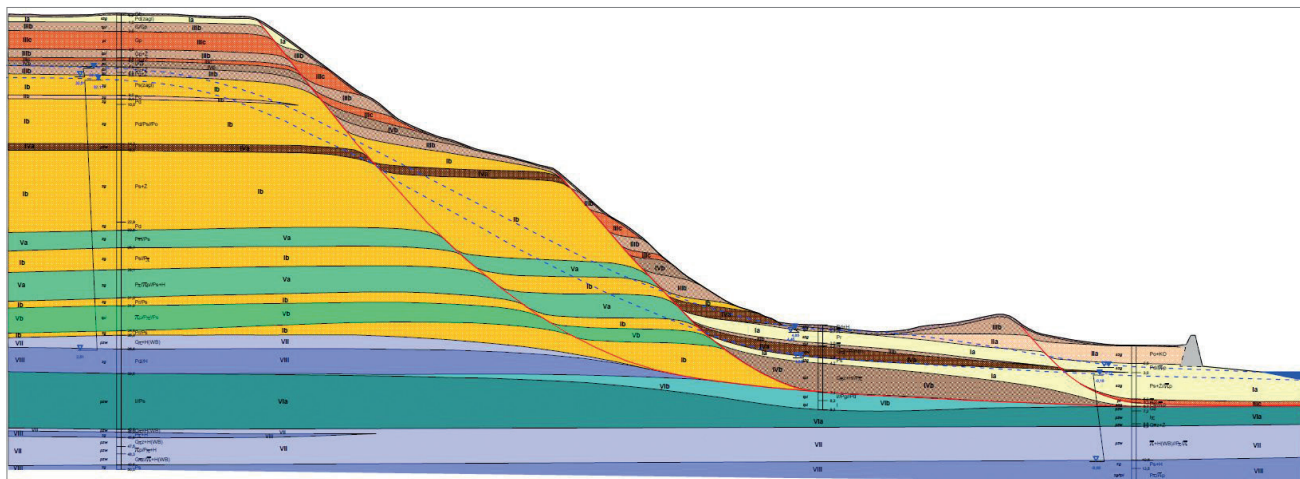
geologiczna klifu jest bardzo skomplikowana. Dominują grunty niespoiste z licznymi przewarstwieniami gruntów spoistych. Właściwości fizyczno-mechaniczne gruntów określono na podstawie wyników badań laboratoryjnych oraz terenowych DPH i SPT [4]. Ze względu na odmienność genetyczną i litologiczną gruntów podzielono je na aż 17 warstw geotechnicznych wraz z podgrupami. Ze względu na wiek i genezę wydzielono grunty czwartorzędowe (holocen i plejstocen) – warstwy I, II, III, IV. Miocen reprezentowany jest przez warstwy VI, VII oraz VIII. Każdą z warstw szczegółowo opisano w DGI [4]. Przykładową budowę geologiczną przedstawia rys. 2.

Pomimo występowania znacznej liczby przewarstwień gruntów spoistych stwierdzono jeden poziom wodonośny, co oznacza, że między warstwami piasków odbywa się przepływ wody. Przebieg zwierciadła wody

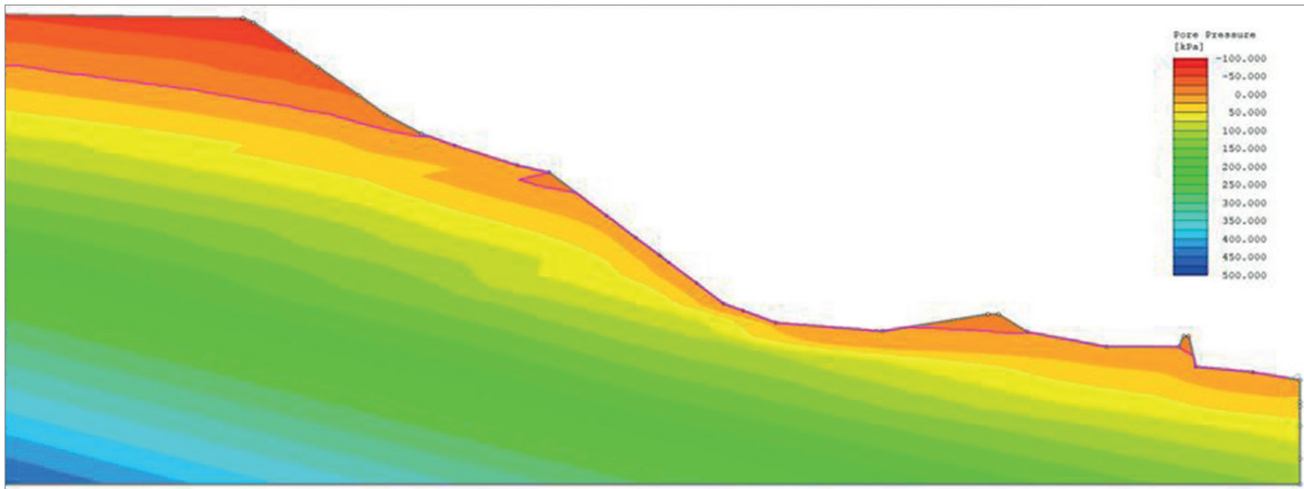
gruntowej w przekrojach poprzecznych klifu zaproponowany w DGI wynika z interpolacji pomiędzy odwiertami zlokalizowanymi na płaskich odcinkach korony i podnóża klifu. Jednakże, jak wynika z obliczeń filtracji, w których jako warunki brzegowe przyjęto wysokości piezometryczne, zwierciadło wody gruntowej kształtuje się bardziej niekorzystnie z wysiękami wody gruntowej na skarpach o dużym nachyleniu.

### Stateczność zbrocza

Do najpopularniejszych technik sprawdzania stateczności zbrocza można zaliczyć metodę zbrocza nieskończonego, metodę równowagi bryły odłamu, metody równowagi granicznej oraz metody numeryczne równań równowagi naprężeń (MES i MRS). Wśród wymienionych metody równowagi granicznej cieszą się największą popularnością z uwagi na łatwość zastosowania oraz



Rys. 2. Przekrój geologiczny IV-IV; źródło: [4]



Rys. 3. Mapa ciśnienia wody w porach gruntu w przekroju IV-IV przed wprowadzeniem rury drenarskiej przy założeniu, że o poziomie zwierciadła wody gruntowej decydują hydrauliczne warunki brzegowe

możliwość uwzględnienia różnych parametrów wytrzymałościowych wewnątrz bryty odłamu. Polegają one na wyznaczeniu, zgodnie z charakterystyką danej metody, powierzchni poślizgu odłamującej się bryty gruntu oraz podzielenie tej bryty na paski. Aby stwierdzić stateczność skarpy, iloraz sumy sił lub momentów utrzymujących i zakłócających stateczność musi być większy od jedności (pomijając współczynniki bezpieczeństwa). Dwa najbardziej znane sposoby obliczeń to metody Felleniusa oraz Bishopa. W programach numerycznych często jednak można spotkać inne, np. Janbu czy Spencera.

Większość tych modeli daje zbliżone rezultaty, kiedy grunt w badanym obszarze jest jednorodny. Różnice pojawiają się, kiedy występują przewarstwienia oraz wysokie kąty nachylenia zbocza [5]. Oba te problemy dotyczą klifu w miejscowości Rozewie.

Analizę stateczności przeprowadzono na modelu w płaskim stanie odkształcenia. Zastosowano metodę stanów granicznych, jak również metodę elementów skończonych do obliczeń filtracji oraz zagadnienia sprzężonego równowagi statycznej i przepływu. Konieczne było przyjęcie odpowiedniego modelu materiałowego warstw podłoża.

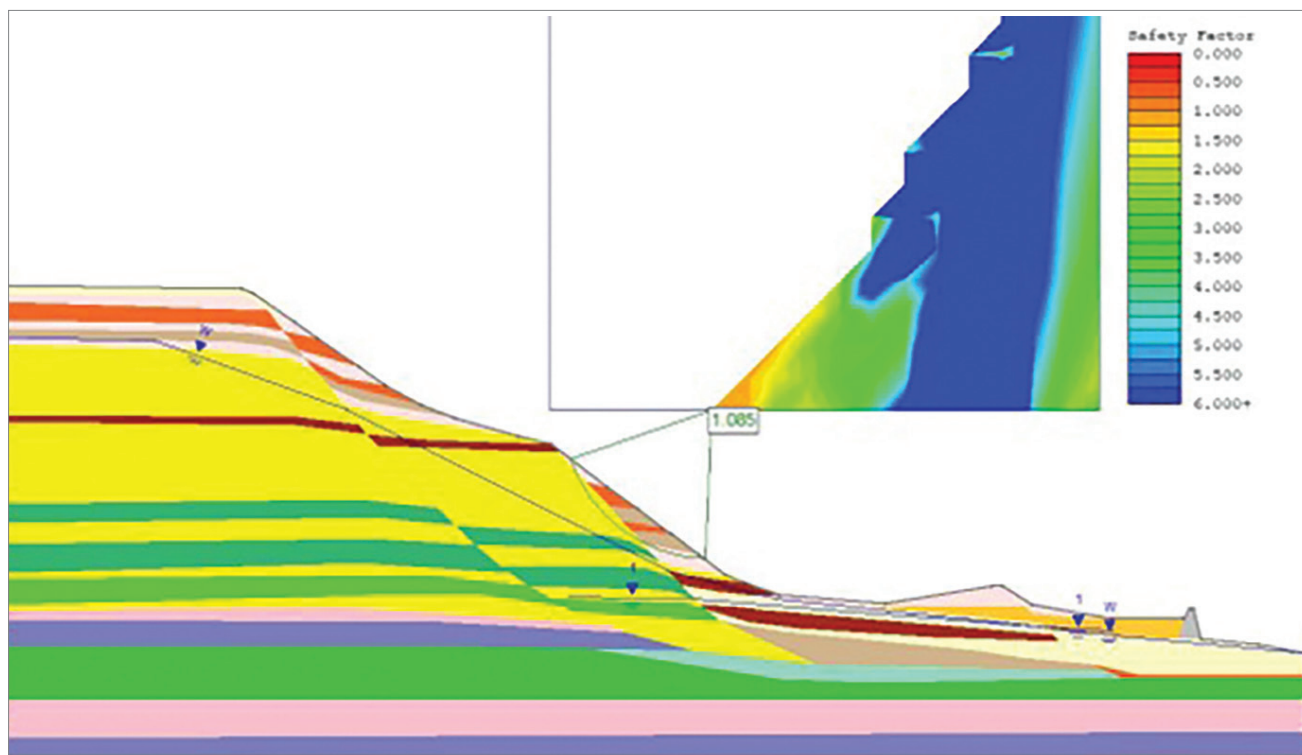
Z uwagi na wytrzymałościowy charakter problemu (stan graniczny nośności) oraz brak dostatecznej ilości badań laboratoryjnych do wszystkich warstw gruntów zastosowano sprężysto-idealnie plastyczny model konstytutywny Mohra-Coulomba. Szczegółowe parametry gruntów przyjęte do modelowania zestawiono w tab. 1.

Obliczenia stateczności klifu przeprowadzono wielowariantowo, używając programu Slide2D wersja 6.0, który do obliczeń wykorzystuje metody równowagi granicznej [6]. Z kolei obliczenia przepływu wody w obszarze klifu przeprowadzono metodą

Tab. 1. Parametry geotechniczne przyjęte na potrzeby wykonania modeli numerycznych

Warstwa gruntu [g/cm <sup>3</sup> ]		$\rho$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma$ [kPa]	$c$ [o]	$\phi$ [MPa]	$E_{\text{sed}}$ [1/m]	$\alpha$ [-]	$n$ [-]
Ia	SiSa FSa	1.78	18	1	30	52	12,4	2,28
Ib	MSa CSa	1.9	19	1	34	152	14,5	2,68
IIa	grSa	1.9	18.5	1	38	157	14,5	2,68
IIb	Gr	2.1	21	1	41	227	14,5	2,68
IIIa	SiSaCl	1.96	19.6	10	33	48	12,4	2,28
IIIb	SiSaCl	1.96	19.6	1	35	32	5,9	1,48
IIIc	SaSi	1.95	19.5	7	11	18	7,5	1,89
IVa	Cl	1.96	19.6	42	26	39	0,8	1,09
IVb	FSa SiSa	1.9	19	30	20	30	12,4	2,28
Va	Si	1.83	18.3	37	31	48	1,6	1,37
Vb	SiSa	1.98	19.8	6	33	33	12,4	2,28
Vc	SaSi	1.85	18.5	5	10	17.4	2	1,41
VIa	Si	2.04	20.4	74	29	39	1,6	1,37
VIb	SiSa	1.94	19.4	23	26	33	12,4	2,28
VII	SaSi	1.57	15.7	38	31	50	7,5	1,89
VIII	MSa CSa	2.05	20.5	1	35	164	14,5	2,68





Rys. 4. Powierzchnia poślizgu oraz współczynnik stateczności w przekroju IV-IV po wprowadzeniu rury drenarskiej przy założeniu, że poziom zwierciadła wody gruntowej przyjęty jest wprost z DGI

elementów skończonych, korzystając z ang. finite element seepage analysis tool, które stanowi jedno z narzędzi programu Slide2D. Pod uwagę wzięto przekrój obliczeniowy 4-4 z uwagi na najmniej korzystne warunki gruntowe. Geometrię modelu, parametry gruntu, położenie zwierciadła wody gruntowej przyjęto zgodnie z DGI. Oszacowane w ten sposób współczynniki potwierdziły brak zachowania stateczności dla analizowanego przekroju. Znajduje to potwierdzenie na podstawie danych przedstawionych w dokumentacji geologiczno-inżynierskiej, gdzie na wielu odcinkach kąt pochylenia zbocza przekracza 40 stopni. Niekorzystnie na stateczność wpływa również obecność wielu płytkich warstw przypowierzchniowych.

### Wariantowa analiza stateczności zbocza

Chcąc dokładniej zbadać wpływ założeń przyjmowanych w modelu numerycznym na stateczność zbocza, sprawdzono inne, dodatkowe warianty obliczeniowe. Uwagę

skupiono na doborze hydraulicznych warunków brzegowych (w tabeli opisanych jako HBC), parametrach funkcji van Genuchtena (w tabeli jako VG) oraz sprawdzono, czy wprowadzenie drenu będzie w stanie poprawić stateczność ogólną zbocza.

Położenie zwierciadła wody gruntowej modelowano na dwa sposoby. Pierwszy polegał na przyjęciu warunków brzegowych dla przepływu, gdzie wyznaczono położenie krzywej depresji, rozwiązując równania przepływu wody. Dolną krawędź analizowanego obszaru założono jako nieprzepuszczalną. Na powierzchni terenu przyjęto możliwość swobodnego odpływu (ang. seepage). Natomiast na prawej i lewej krawędzi modelowanego obszaru przypisano wartości wysokości piezometrycznej (ang. head) zgodnie z DGI. Alternatywą było założenie przebiegu krzywej depresji, jaki zaproponowano na podstawie interpolacji pomiędzy otworami badawczymi w DGI (w tabeli oznaczono jako „zwgDGI”).

Uwagę skupiono również na modelowaniu strefy aeracji, gdzie zastosowano dostępną

w programie funkcję van Genuchtena. Funkcja ta to jeden z najdokładniejszych modeli matematycznych opisujących zależność między wilgotnością a ciśnieniem ssania. W zależności od postaci matematycznej funkcja ta reprezentowana jest przez 2 lub 3 parametry, których przykładowe wartości można znaleźć w wielu publikacjach zagranicznych oraz krajowych np. [7, 8]. Zastosowanie modelu van Genuchtena pozwala na opis krzywej retencji w gruntach nienasyconych, co ma bezpośredni wpływ na wartości naprężenia efektywnego oraz prędkość filtracji. Program Slide2D umożliwia obliczenia z zastosowaniem dwóch parametrów: n (parametr związany z wielkością porów w gruncie) oraz  $\alpha$  (parametr skalujący wartość ssania). Dokładne przyjęcie wymienionych wielkości ściśle zależy od rodzaju gruntu. Przyjęcie takich samych parametrów w całym modelu może okazać się rozwiązaniem bardzo pobieżnym, co zostanie przedstawione w analizie wyników. Celem sprawdzenia, jak model van Genuchtena wpływa na wyniki, sprawdzono trzy warianty obliczeniowe: model VG wyłączone („VG off”), parametry VG równe 2.0 („VG=2”) oraz rzeczywiste parametry VG przyjęte wg tablicy znajdującej się w programie Slide2D („VG real”, parametry znajdują się w tab. 1.).

Ostatnia analiza sprawdziła wpływ wykonania drenu w klifie. W zależności od modelowania krzywej depresji dla drenu przyjęto różne warunki brzegowe. W wariantcie obliczeniowym, gdzie krzywa depresji była zgodna z DGI, przyjęto ciśnienie równe 0 kPa.

Tab. 2. Wyznaczone wskaźniki stateczności zbocza dla przekroju IV-IV

	zwg HBC			zwg DGI		
	z drenem		bez drenu	z drenem	bez drenu	
	VG off	VG=2	VG real	VG real	VG off	
Fellenius	1.08	1.026	<1.0	<1.0	1.085	1.08
Bishop	1.165	1.087	<1.0	<1.0	1.18	1.138
Janbu	1.069	0.996	<1.0	<1.0	1.08	0.995
Spencer	1.157	1.098	<1.0	<1.0	1.18	1.141

Natomiast w wariancie, w którym przebieg krzywej depresji wynikał z obliczeń filtracyjnych. przyjęto w linii drenu wartość wysokości piezometrycznej zgodną z DGI.

## Analiza wyników

W opisanych w poprzednim rozdziale wariantach wykonano serię obliczeń, w których skupiono się na porównaniu wskaźnika stateczności zbocza. Zestawienie wyników obliczeń stateczności metodami analizy granicznej: Felleniusa, Bishopa, Janbu oraz Spencera zaprezentowano w tab. 2. W przekroju kluczowy okazał się sposób przyjęcia poziomu zwierciadła wody gruntowej oraz drenu. Przyjmując, że przebieg krzywej depresji odpowiada założeniom z DGI oraz modelując drenaż w sposób, który zakłada grawitacyjny odptyw wody, otrzymuje się wskaźnik stateczności zbocza niewiele większy od 1.0 (rys. 4.). Porównując wyniki przedstawione na rys. 2. oraz rys. 3., można zauważyć, że poziom wody gruntowej obliczany na podstawie wysokości piezometrycznych jest wyższy niż założony w DGI. Efektem jest otrzymanie niższych wskaźników stateczności klifu. Z kolei z tab. 2. wynika, że bez względu na analizowany wariant wprowadzenie drenu nie gwarantuje bezpieczeństwa. Wskaźniki są w większości przypadków zbliżone do 1.0 (z dokładnością do 10%). Należy jednak zwrócić uwagę na wartości parametrów funkcji van Genuchtena. Przyjęcie obu parametrów równych 2.0 lub całkowite pominięcie przepływu w strefie aeracji prowadzi do zawyżenia wskaźnika stateczności. Na podstawie zaleceń literaturowych [7] można dobrać realistyczne parametry we wszystkich warstwach geotechnicznych w obrębie modelu klifu w zależności od ich pochodzenia. W efekcie otrzymuje się jednak znacznie mniejsze wartości wskaźnika stateczności.

## Wnioski

Podsumowując, można stwierdzić, że obecny stan klifu wymaga zastosowania rozwiązań, które są w stanie zwiększyć jego stateczność. Analizując przedstawioną dokumentację geologiczną oraz wariantową analizę obliczeń wykonaną w programie Slide2D, jednoznacznie można stwierdzić, że zapas bezpieczeństwa wynikający z oszacowanych wskaźników jest niewystarczający. Wymagane jest zastosowanie rozwiązań konstrukcyjnych pozwalających ograniczyć postępującą degradację związaną z procesami osuwiskowymi.

Podstawowy problem związany ze statecznością klifu dotyczy niekorzystnych warunków wodnych i rozkładu ciśnienia wody w wydzielonych warstwach geotechnicznych. Wyznaczone za pomocą krzywej depresji poziom zwierciadła wody gruntowej osiąga powierzchnię terenu, co jest szczególnie niebezpieczne na odcinkach przekroju

poprzecznego klifu, które charakteryzuje znaczne nachylenie (przekraczające 40°). Bazując bezpośrednio na wartościach parametrów wytrzymałościowych oszacowanych w DGI oraz na podstawie rozkładu ciśnienia wody w porach gruntu, nie można potwierdzić aktualnego stanu równowagi, jak również poprawy tego stanu po wprowadzeniu drenów.

Aby opracować jednoznaczną ocenę stateczności zbocza, konieczne jest wykonanie dokładniejszych analiz z wykorzystaniem metody elementów skończonych w układzie przestrzennym. Rozwiązanie to pomogłoby uwzględnić sprzężenie hydrauliczno-mechaniczne oraz rzeczywisty rozstaw drenów.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Marciniak P. i in., Osuwiska w Polsce: od rejestracji do prognozy, czyli 13 lat projektu SOPO. „Przegląd Geologiczny” 67.5 (2019).
- [2] Cała M., Osuwiska w Polsce i na świecie. „Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne” 3 (2009): 68–74.
- [3] Dokumentacja geologiczno-inżynierska. W celu określenia warunków geologiczno-inżynierskich dla remontu i odbudowy klifu w km 130,7 do km 134,5 brzegu morskiego w miejscowości Rozewie. Etap I km 130+950 –131+430 – Obszar zespotu latarni morskiej Rozewie. Geocore Sp. z o.o., lipiec 2022.
- [4] Ekspertyza techniczna Politechniki Gdańskiej. Analiza projektu architektoniczno-budowlanego dotyczącego remontu i odbudowy odwodnienia klifu od km 130+700 do km 134+500 brzegu morskiego w miejscowości Rozewie, ETAP I od km 130+950 do km 131+430 – Obszar zespotu latarni morskiej Rozewie. Gdańsk, sierpień 2023.
- [5] Cała M., Flisiak J., Analiza stateczności skarp i zboczy w świetle obliczeń analitycznych i numerycznych. Katedra Geomechaniki Górniczej i Geotechniki, AGH, 2000.
- [6] Slide 2D: Manual do programu. Rockscience, 2002.
- [7] Vogel T., van Genuchten M.Th., Cislérova M. Effect of the shape of the soil hydraulic functions near saturation on variably-saturated flow predictions. „Advances in Water Resources” 24(2), 2000.
- [8] Szymkiewicz A., Sikora Z., Ossowski R., Tisler W., Właściwości retencyjne, przewodność hydrauliczna i naprężenia efektywne w gruntach nienasyconych. „Inżynieria Morska i Geotechnika” 2014.

DOI: 10.5604/01.3001.0054.8414

## PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA

Tisler Witold, Pałasz Wiktoria, Pierzchliński Tomasz, Piórkowska Natalia, Szulc Kacper, 2024, Analiza stateczności skarpy klifu w ciągu brzegu morskiego w miejscowości Rozewie, „Builder” 12 (329).

DOI: 10.5604/01.3001.0054.8414

## STRESZCZENIE:

Artykuł porusza problematykę stateczności klifu znajdującego się w strefie przybrzeżnej miejscowości Rozewie. Z uwagi na gęstą roślinność oraz wysoki poziom wód gruntowych zbocze osuwa się w stronę morza i może wymagać wzmocnienia. Ingerencję w zbocze utrudnia zalesienie obszaru oraz obecność drzew mających status pomnika przyrody. Obliczenia wykonane na potrzeby niniejszego artykułu skupiają się na określeniu stateczności zbocza dla wybranego przekroju, w którym stwierdzono najniekorzystniejsze warunki gruntowe. Symulacje wykonano w programie Slide2D wersja 6.0., który do obliczeń wykorzystuje metody równowagi granicznej. Stateczność z uwagi na złożony układ warstw gruntowych porównano dla

czterech dostępnych modeli obliczeniowych: Fellenius, Bishop, Janbu, Spencer, które nie różniły się znacząco wartościami końcowymi. W analizie wariantowej sprawdzono również wpływ sposobu modelowania poziomu zwierciadła wody gruntowej oraz przyjęcia parametrów funkcji van Genuchtena odpowiedzialnej za przepływ wody w strefie aeracji. Bez względu na przyjęte parametry oraz założenia można jednoznacznie stwierdzić, że zapas bezpieczeństwa wynikający z oszacowanych wskaźników jest niewystarczający.

## SŁOWA KLUCZOWE:

stateczność, osuwisko, strefa aeracji, metoda Felleniusa

## ABSTRACT:

### ANALYSIS OF THE STABILITY OF THE CLIFF IN THE SEA SHORE REGION IN ROZEWIE.

The article discusses the problem of stability of the cliff located in the coastal zone in city Rozewie. Due to dense vegetation and high groundwater levels, the slope is sliding towards the Baltic sea and may require immediate strengthening. Unfortunately, all planned actions may be difficult to do because of high trees on the area with the status of a natural monument. The calculations performed in this article focus on determining the slope stability for the selected cross-section in which the most unfavorable ground conditions were found. The simulations were performed in the program Slide2D version 6.0, which uses the limit equilibrium methods for calculations. The slope stability due to the complex of soil layers was compared for four available computational models: Fellenius, Bishop, Janbu, Spencer, which did not differ significantly in final values. The variant analysis also checked the influence of the method of modeling the groundwater table level and the adoption of the parameters of the van Genuchten mathematical model. The mentioned function is responsible for the water flow in the aeration zone. Regardless of the adopted parameters and assumptions, it can be clearly stated that the safety margin resulting from the estimated factors is insufficient.

## KEYWORDS:

slope stability, landslide, aeration zone, Fellenius method