

## Dokumentowanie geologiczne na potrzeby posadowienia obiektów naukowej stacji badawczej w warunkach polarnych

Paweł Pietrzykowski<sup>1</sup>, Paweł Dobak<sup>2</sup>, Ewa Krogulec<sup>2</sup>, Tomasz Krogulec<sup>2</sup>, Jerzy Małecki<sup>2</sup>



P. Pietrzykowski



P. Dobak



E. Krogulec



T. Krogulec



J. Małecki

**Geological investigations reporting in polar conditions for civil engineering at the example of the construction of research station.** *Prz. Geol.*, 65: 692–700.

*A b s t r a c t.* The methodological experience and the results of observation and research have been presented as a part of an expert geological and engineering study for the planned extension of the Henryk Arctowski

*Polar Station on the coast of King George Island in the South Shetland Islands in Antarctica. The object is realized in an area requiring recognition of specific geodynamic conditions. According to technical requirements coming from the conceptual design project of the station (Kuryłowicz and Associates, 2015) it was necessary to adopt a non-standard research program. Engineering and geological characteristics are presented in comparison with geoenvironmental considerations. The assessment of soil and rock properties was carried out in relation to the results of observations and determinations of parameters that could be assessed in the coarse-grained soils and rocks in the area of the designed object.*

**Keywords:** *engineering geology, Antarctica, Arctowski Polar Station*

Polska Stacja Antarktyczna im. Henryka Arctowskiego funkcjonuje od 1977 r. na wąskim *plateau* wybrzeża Zatoki Admiralicji na Wyspie Króla Jerzego (Szetlandy Południowe). Istniejące obiekty stacji są zlokalizowane na płaskim obszarze wzniesionym w stosunku do średniego poziomu morza od ok. 2 do ok. 5 m. Postępująca abrazja morska powoduje konieczność zmiany lokalizacji centrum stacji, a w efekcie budowę nowoczesnego obiektu laboratoryjno-mieszkalnego odsuniętego o kilkaset metrów od aktualnej linii wybrzeża. Nowy obiekt ma być zlokalizowany między obniżeniem objętym akumulacją organiczną (tzw. mszarnikiem) a zboczem skalistym, pokrytym osadami koluwalno-deluwialnymi o średnim nachyleniu ok. 26°. Wynikają stąd dodatkowe wymagania związane z ochroną warunków biologicznych mszarnika oraz potrzebą oceny potencjalnych zagrożeń geodynamicznych od strony zbocza.

Zakres zrealizowanych w marcu 2016 r. obserwacji i prac dokumentacyjnych określono w nawiązaniu do wielobranżowego projektu koncepcyjnego Polskiej Stacji Antarktycznej im. H. Arctowskiego na Wyspie Króla Jerzego sporządzonego w zespole Kuryłowicz & Associates w 2015 r. Zawiera on m.in. szczegółowe dane lokalizacyjne obiektu, koncepcję architektoniczną, a także alternatywne propozycje rozwiązań fundamentów wraz z ich wstępnym rozmieszczeniem. Dane te (Kuryłowicz & Associates, 2015) wykorzystano za zgodą gospodarza stacji – Instytutu Biochemii i Biofizyki PAN.

Projektowany nowy obiekt laboratoryjno-mieszkalny ma być usytuowany na 40 słupach wynoszących część kubaturą na ok. 2 m nad powierzchnię terenu. Obciążenia będą przekazywane przez słupy na płyty żelbetowe i dalej

na podłoże gruntowe opcjonalnie: jako fundamenty bezpośrednio w formie pakietów połączonych płyt żelbetowych lub też dodatkowo z zastosowaniem mikropali.

Badania oraz prace analityczne zaprojektowano tak, żeby w tych nietypowych warunkach nawiązywać w miarę możliwości do standardów opartych o polskie i europejskie akty prawne oraz normy techniczne. W szczególności nawiązywano do metodyki dokumentowania warunków geologiczno-inżynierskich (akt wykonawczy – Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 8 maja 2014 r. w sprawie dokumentacji hydrogeologicznej i geologiczno-inżynierskiej – wydany na podstawie Prawa geologicznego i górniczego (Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r.) oraz Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 25 kwietnia 2012 r. w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych – wydane na podstawie Prawa budowlanego (Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r.), a także branżowych polskich i europejskich norm (m.in. PN-EN 1997-2:2009) oraz instrukcji.

Oceniono możliwości aplikacji tych standardowych wymagań dokumentacyjnych w nietypowych warunkach antarktycznych, ale przede wszystkim w trakcie prowadzonych prac dokumentacyjnych uwzględniono wybrane specyficzne elementy środowiska geologicznego, takie jak skutki pływów na zmiany stanu naprężeń efektywnych w podłożu, sejsmiczność terenu, zjawiska falowania wywołane „cienieniem” i obrotem gór lodowych, abrazję i aktualny rozwój procesów wietrzeniowych na wychodniach skał.

Celem nadrzędnym publikacji jest zatem przybliżenie czytelnikowi problematyki dokumentacyjnej i przyjętych

<sup>1</sup> Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; pawel.pietrzykowski@pgi.gov.pl.

<sup>2</sup> Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; p.dobak@uw.edu.pl, ewa.krogulec@uw.edu.pl.

rozwiązań w niespotykanym w codziennej pracy geologa inżynierskiego klimacie polarnym. Można ją potraktować jako rzadko spotykaną ciekawostkę zawodową, ale jednocześnie jako przykład podjęcia tematyki oceny warunków geologiczno-inżynierskich, uwzględniającej szerszy zakres prac, niż wydzielenie warstw litologiczno-stratygraficznych i przypisanie im odpowiednich cech fizyczno-mechanicznych.

### BADANIA TERENOWE PODŁOŻA PROJEKTOWANEJ BUDOWLI

Prace terenowe prowadzono w celu rozpoznania warunków gruntowo-wodnych w rejonie projektowanego obiektu budowlanego. Badania rozpoczęto od próby wykonania płytkich otworów wiertniczych metodą ręczną, opartych na zasadach zgodnych z normą PN-EN ISO 22475-1:2006. Grubookruchowy charakter podłoża spowodował jednak znaczne opory i brak postępu wiercenia. Stąd podjęto decyzję o wykonaniu koparką 10 wielkowymiarowych (ok.  $2 \times 4$  m) odkrywek badawczych oznaczonych jako punkty dokumentacyjne O1–O10.

Pomimo zastosowania sprzętu zmechanizowanego zasięg głębokościowy rozpoznania był ograniczony. Prace przerywano z powodu braku postępu w pogłębianiu wykopu, spowodowanego znacznym oporem eksplorowanego podłoża. W efekcie uzyskiwano charakterystykę profili w przedziale 0,8–1,6 m p.p.t.

Występowanie uwarstwionych, grubo- i bardzo gruboziarnistych gruntów potwierdziło zasadność wykonania

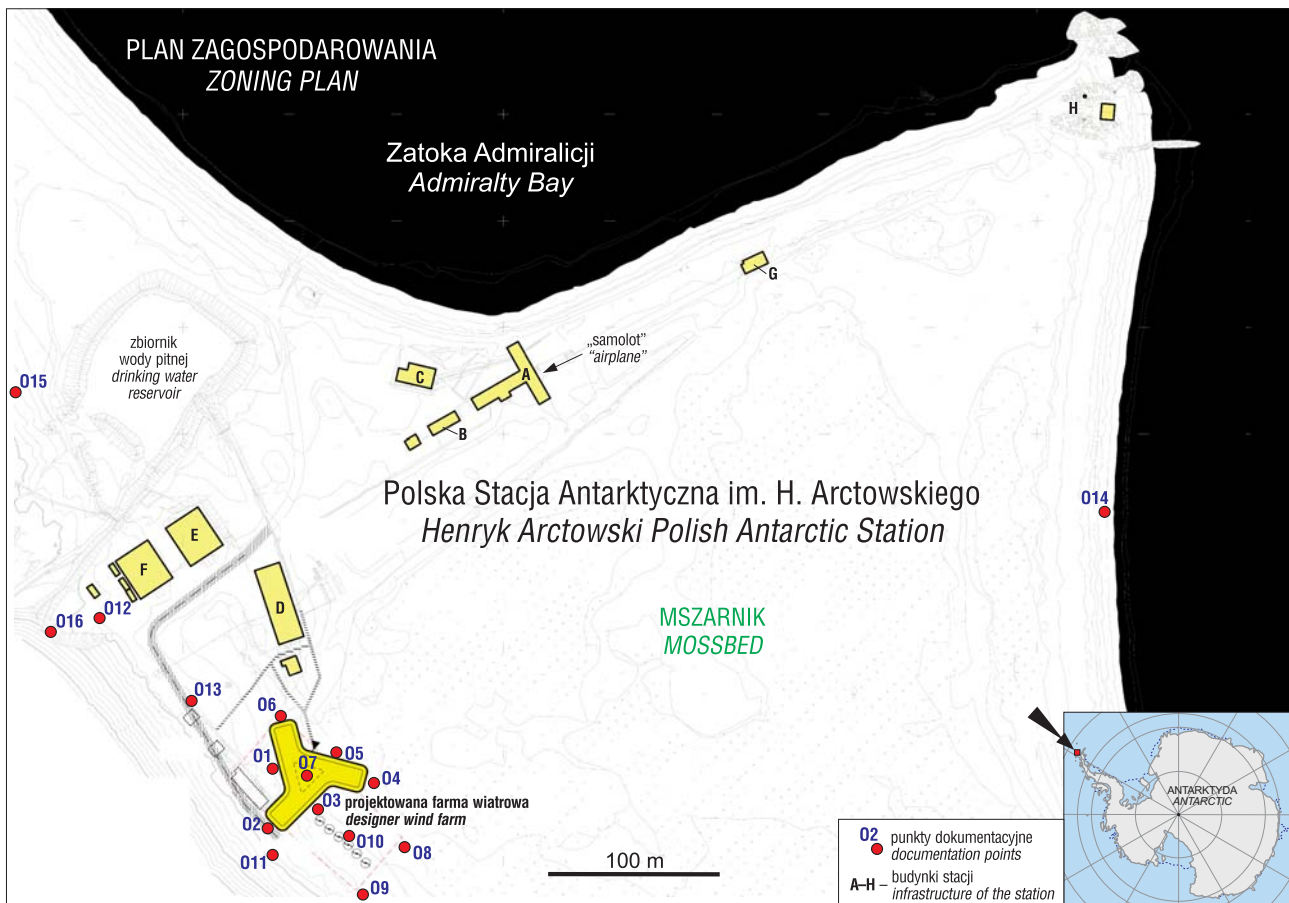
odkrywek kopanych. Kontynuowanie prób wykonywania typowych w „klasycznym” dokumentowaniu wierceń małosrednicowych nie odwzorowywałoby charakteru wykształcenia pokryw deluwialnych, osadów morenowych oraz postlitoralnych, w których dominują głązy, kamienie i otoczaki.

Usytuowanie miejsc prowadzenia obserwacji oraz wyrobisk dokumentacyjnych na tle obecnego i planowanego zagospodarowania Stacji im. H. Arctowskiego ilustrują mapa (ryc. 1) oraz fotografia (ryc. 2).

Wykopy badawcze w rejonie projektowanego obiektu rozmieszczono celowo poza planowanym obrębem budynku (z wyjątkiem O7), tak żeby uniknąć ewentualnego konfliktu z lokalizacją projektowanych 40 podstaw fundamentowych zaznaczonych w „Projekcie koncepcyjnym...” (ryc. 3). Ewentualne przesunięcia lokalizacji i zmiany założeń konstrukcyjnych obiektu w rejonie wykonanych badań dokumentacyjnych mogą w przyszłości spowodować posadowienie fundamentów w miejscach, gdzie odkrywki zasypiano urobkiem i tym samym struktura podłoża została sztucznie zaburzona i osłabiona.

Dodatkowo na południe od projektowanego obiektu wykonano odkrywkę O11 w osadach stokowych i podstokowych celem oszacowania miąższości i charakteru koluwiów/deluwiów oraz zazębienia się gruntów o genezie osypiskowej i morskiej.

Poza planowanym terenem usytuowania obiektu, w jego północno-zachodnim sąsiedztwie, wykonano dodatkowo trzy odkrywki badawcze (O12, O13, O15), żeby

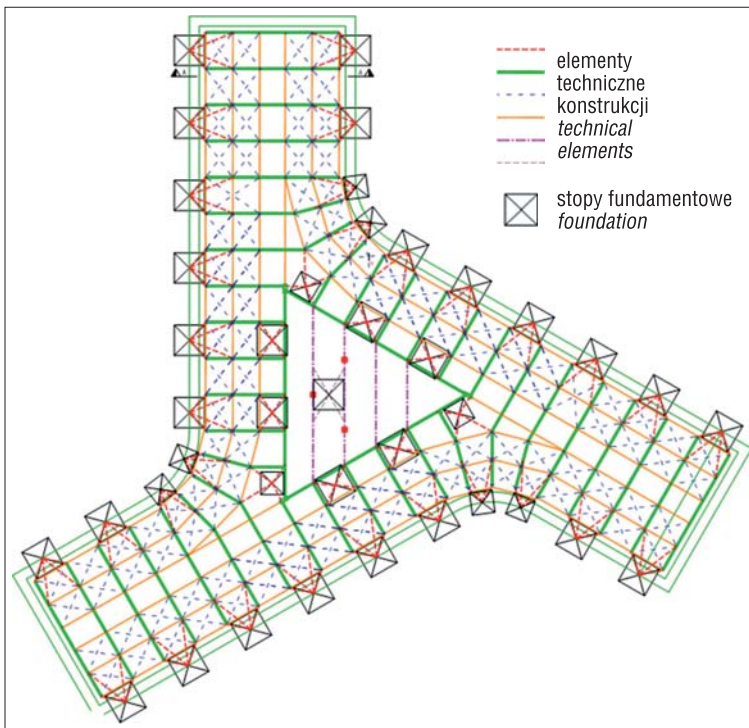


Ryc. 1. Schematyczne rozmieszczenie punktów dokumentacyjnych na planie zagospodarowania Polskiej Stacji Antarktycznej im. H. Arctowskiego

Fig. 1. The scheme of documentation points' location on the plan of Henryk Arctowski Polish Antarctic Station



**Ryc. 2.** Perspektywiczny widok usytuowania punktów dokumentacyjnych w rejonie projektowanego budynku  
**Fig. 2.** The view of documentation points' location in the area of designed building



**Ryc. 3.** Orientacyjne położenie stóp fundamentowych projektowanego budynku stacji (Kuryłowicz & Associates, 2015)  
**Fig. 3.** The scheme of shallow foundations' location for designed building (Kuryłowicz & Associates, 2015)



ocenić jednorodność rozpoznanych warunków geologiczno-inżynierskich. Odkrytki te zlokalizowano w rejonie wiatraka (O13), hali magazynowej nr 2 (O12) oraz przy zbiorniku wody pitnej (O15).

Uzupełniające dwa punkty dokumentacyjne to wykop w ścianie w pobliżu hali magazynowej nr 2 (O16) oraz punkt na plaży w niedalekim sąsiedztwie latarni morskiej (O14). Punkt dokumentacyjny na plaży to miejsce poboru próbki piasku morskiego pozbawionego grubych frakcji kamienistych dla porównania parametrów litologiczno-granulometrycznych z gruntami rozpoznawanymi w pozostałych punktach dokumentacyjnych.

W toku prac terenowych stwierdzono płytkie występowanie wód gruntowych. Kontynuacja dalszego pogłębiania wyrobisk każdorazowo wymagała ich odpompowywania na czas kontynuacji prac (ryc. 4). Wywoływana w ten sposób niewielka depresja zwierciadła wody w gruncie była krótkotrwała. Po ok. 5–15 minutach, ze względu na bardzo dużą przepuszczalność ośrodka gruntowego, woda napływała ponownie do wykopu. Punktowe, krótkotrwałe odwadnianie nie zaburzało warunków hydrogeologicznych na tyle, żeby ingerować w środowisko biotyczne mszarnika.

Woda podziemna w rejonie mszarnika stabilizuje się płytko na głębokości ok. 0,1–0,3 m p.p.t., natomiast w kierunku zbocza, ze względu na podwyższenie terenu, wodę w wyrobiskach stwierdzano na głębokości ok. 1,3–1,4 m p.p.t. W koluwiach, bezpośrednio u podnóża zbocza, wody gruntowej nie rejestrowano do głębokości ok. 2,5 m.

Ze względu na zjawiska pływów morskich, w wyniku kontaktu hydraulicznego z wodami morskimi, poziom



**Fig. 4.** Przykład odwadniania wyrobiska z widocznym charakterystycznym grubookruchowym materiałem o znacznej przepuszczalności

**Ryc. 4.** The example of the excavation's dewatering with visible and characteristic high permeability coarse-grained soils

zwierciadła wody w wyrobiskach badawczych ulegał zauważalnym wahaniom. Pomiarzy prowadzone o różnych porach przyływów i odpływów wykazały w rejonie projektowanej inwestycji różnice poziomu zwierciadła wód w profilu gruntowym rzędu ok. 15 cm. Jednocześnie wyniki pomiarów wybranych parametrów fizykochemicznych wód gruntowych w odkrywkach nie odbiegały od chemizmu wód słodkich, co świadczy o niemieszaniu się ich z wodami z pobliskiej zatoki.

## OCENA WYBRANYCH ASPEKTÓW GEODYNAMICZNYCH

### Ocena odbojności na wychodniach skał jako wskaźnik stopnia zwietrzenia

Teren projektowanego obiektu stacji jest położony u podnóża zbocza pokrytego zwietrzałym materiałem skalnym. W związku z tym na odcinku sąsiadującym z nim oceniono stopień zwietrzenia nadległych skał intruzywnych (andezytów), piroklastycznych oraz przekształconych w osadowe konglomeraty. Należą one do tzw. ognia Hala z formacji Zatoki Arctowskiego (Birkenmajer, 1980) i stanowią źródło materiału koluwalnego.

W celu wskaźnikowej oceny stopnia zwięzłości skał, obecności ukrytych spękań i powierzchni nieciągłości, a w konsekwencji predyspozycji wietrzeniowych, oznaczono ich odbojność młotkiem Schmidta. Narzędzie to standardowo służy do terenowego szacowania zmian cech mechanicznych ośrodka na podstawie wyznaczania względnych wartości tzw. wskaźnika odbojności, stanowiącego miarę sprężystej reakcji materiału na aplikowaną energię udaru. W skałach miękkich oraz spękanych uzyskuje się małą odbojność, natomiast skały twarde charakteryzują się odbojnością dużą. Ta ogólna zależność pozwala szacować także stopień zwietrzenia, gdyż skały przekształcone procesami wietrzenia mają wskaźnik odbojności mniejszy od fragmentów masywu niezwiertzonego.

Na rycinie 5 przedstawiono lokalizację profili pomiarowych poprowadzonych na wybranych odcinkach zboczy. Główny, położony w wyższej części zbocza ciąg pomiarowy miał długość 183 m. Ze względu na występowanie we wschodniej części zbocza odmiennego makroskopowo typu litologicznego skał, pojawiającego się poniżej badanych wychodni, wykonano dodatkowo odczyty w niższym (krótkim – 14 m) profilu pomiarowym. Porównawczo zrealizowano pomiary także na oddalonych od projektowanego

obiekty wychodniach skał ogniw Skua Cliff i Petrified Forest formacji Zatoki Arctowskiego (Birkenmajer, 1980), wzdłuż strumienia Petrified Forest (ryc. 6), przedłużając profil pomiarowy do wychodni nad zbiornikiem wody pitnej.

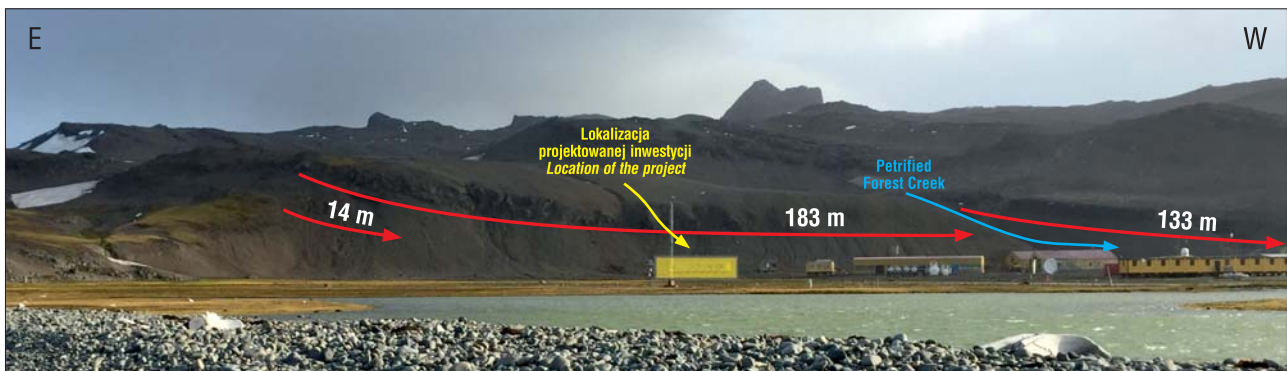
Zgodnie z przyjętym schematem pomiarowym na każdym metrze bieżącym profilu wykonywano od 8 do 26 oznaczeń. Liczne pomiary odbojności (łącznie ok. 4 tys.), przeprowadzone w trzech rejonach, ilustrują przestrzenną zmienność procesów wietrzenia na zboczu sąsiadującym z terenem stacji. Uzyskiwano wartości wskaźnika odbojności w niemal pełnym zakresie pomiarowym młotka (0,1–5,4). Ilustruje to znaczne zróżnicowanie przestrzenne spękań i defektów w skałach, wpływających na stopień tłumienia generowanej udarowej fali sprężystej.

Statystyczne opracowanie wyników pomiarów (tab. 1) dokumentują zarówno bezwymiarowe wartości bezwzględne odbojności, jak i charakter jej zmienności.

Górna część zbocza, nad rejonem planowanej lokalizacji nowego obiektu stacji, wykazuje najwyższe wartości wskaźnika odbojności, ale warto też zwrócić uwagę na znaczną zmienność uzyskiwaną w poszczególnych ciągach pomiarowych. Sygnalizuje to strefową inicjację procesów wietrzeniowych. Duża zmienność wartości mierzonej odbojności wystąpiła na całej długości górnego profilu. Wzdłuż ciągów pomiarowych rejestrowano miejsca, gdzie duża odbojność wyraźnie świadczyła o występowaniu niezwiertzonych fragmentów oraz te, w których mała odbojność wskazywała na predyspozycje do intensyfikacji wietrzenia. Lokalnie duża odbojność charakteryzowała także odspojone, duże fragmenty skał o małym stopniu zwietrzenia, co jednak sztucznie podwyższało charakterystyki statystyczne całych ciągów pomiarowych.

W przypadku erozyjnego rozcięcia w rejonie strumienia Petrified Forest i nad zbiornikiem wody pitnej statystyka parametrów wskazuje na niższą odbojność, co wynika zapewne z erozyjnego odsłonięcia ułatwiającego procesy wietrzeniowe.

W tym rejonie badania odbojności mają bardzo szacunkowy charakter, gdyż całość profilu stanowiły silnie zwietrzałe skały ognia Skua Cliff i ognia Petrified Forest. Pojedyncze zarejestrowane pomiary, sugerujące niezwiertzone fragmenty wychodni skał, są *de facto* pomiarami odspojonych od górotworu dużych fragmentów skalnych. Stopień zwietrzenia skał w rejonie zbiornika wody pitnej jest duży, procesy dezintegracyjne dają zwietrzelinę gliniastą, a osady stokowe i podstokowe charakteryzują się małą liczbą głazów i/lub grubych okruchów skał. Pomimo



Ryc. 5. Rejon badań odbojności wychodni skał z zaznaczonymi kierunkami profili pomiarowych  
Fig. 5. The area of rebound tests on rock outcrops with marked directions of measuring profiles

**Tab. 1.** Statystyka pomiarów odbojności skał  
**Table 1.** Statistics of rebound tests

Parametry statystyczne Statistics parameters			Rejon badań / The area of tests		
			Zbocze nad projektowanym Slope above the building		Wzdłuż strumienia Petrified Forest i nad zbiornikiem wody pitnej Along The Petrified Forest Creek and above the drinking water reservoir
			Górny profil Upper profile	Dolny profil Lower profile	
Liczba ciągów pomiarowych Number of measurement series			142	14	127
Liczba pomiarów Number of measurements			2486	69	1371
Statystyczne charakterystyki wskaźnika odbojności Statistics of rebound index	dla poszczególnych ciągów pomiarowych for testing series	średnia mean	2,1	0,9	1,3
		minimum minimum	0,8	0,8	0,8
		maksimum maximum	4	1,1	2,8
		odchylenie standardowe standard deviation	0,1–1,5 śr. 0,7	0,0–0,3 śr. 0,1	0,0–1,4 śr. 0,4
		współczynnik zmienności coefficient of variation	0,1–0,7 śr. 0,4	0,0–0,3 śr. 0,1	0,0–0,9 śr. 0,3
	dla analizowanego rejonu in tested area	średnia mean	2,2	0,9	0,4
		odchylenie standardowe standard deviation	1,065	0,24	0,72
		współczynnik zmienności coefficient of variation	0,48	0,25	0,51

lokalnie występujących dużych odbojności, zwiertzały na ogół materiał skalny w rejonie zbiornika wody pitnej charakteryzował się znacznym tłumieniem fali sprężystej generowanej przez młotek.

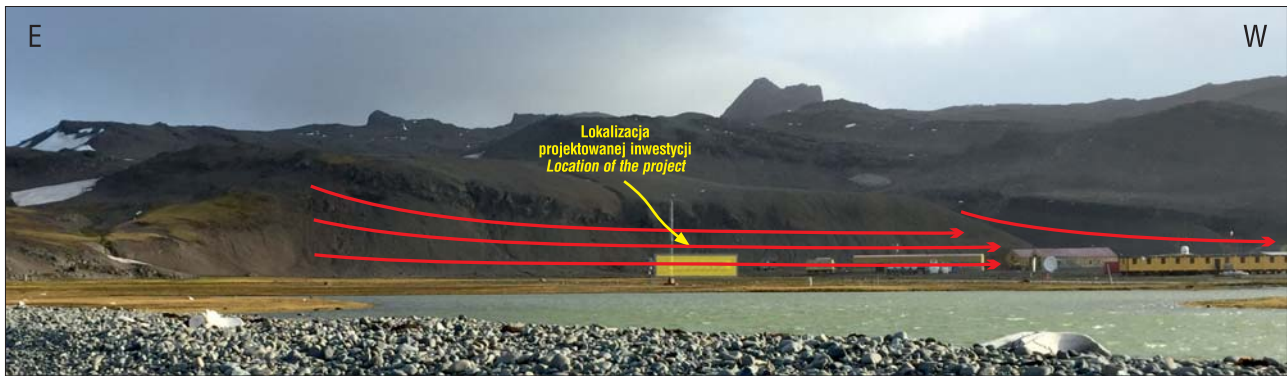
Bardzo małe wartości wskaźnika odbojności występują w dolnej części zbocza i świadczą o znacznym stopniu zwiertzenia, dodatkowo zintensyfikowanym przemieszczeniem materiału skalnego. Strefa ta stanowi więc największe zagrożenie powierzchniowymi ruchami masowymi. Na

podstawie obserwacji można wysnuć wniosek, że grube niezwiertzałe okruchy skał stanowią pojedyncze fragmenty koluwiów i deluwiów, gdyż zbocze pokrywają koluwia o uziarnieniu rumoszu gliniastego (patrz tab. 2).

Przeprowadzone pomiary ogólnie wskazują na bardzo dużą zmienność przestrzenną wskaźnika odbojności. Przemieszczenia zbocza zachodzą najszybciej w tych jego partiach, w których udokumentowano najmniejsze wartości wskaźnika odbojności. Można stwierdzić, że proces wie-

**Tab. 2.** Wyniki badań granulometrycznych gruntów niespoistych (sypkich)  
**Table 2.** Results of gradation tests of non-cohesive soils

Nazwa próbki Sample number	Rodzaj gruntu Type of soil		Zawartość frakcji Percentage of main fractions [%]			Współczynnik filtracji <i>k</i> Coefficient of permeability <i>k</i> [m/d]	Wskaźnik jednorodności uziarnienia <i>U</i> Uniformity coefficient <i>U</i> [-]	Wskaźnik krzywizny uziarnienia <i>C</i> Coefficient of curvature <i>C</i> [-]
	Nazwa wg: Type of soil according to: PN-B-02480:1986	Symbol wg: Symbol of soil according to: PN-EN ISO 14688-1:2006	Żwirowej i kamienistej Cobble and gravel	Piaskowej Sand	Pyłowej i ilowej Silt and clay			
O1/0,5–0,6	żwir gravel	Gr	50–90	10–50	0–2	> 500	10–200	1–3
O1/0,8–1,0								
O3/0,4								
O3/0,8								
O5/0,4								
O5/0,8–1,0	piasek gruby coarse sand	Csa	0–5	70–100	0–1	100–500	2–5	1
O14/0,0								
O11/1,8								
O12/0,7								
O13/1,0								
O1/0,3	pospółka gravelly sand	grSa	20–40					
O5/0,2								
O6/0,4								
O11/0,6–0,8								
	pospółka gliniasta clayey gravelly sand	clgrSa	40	50	5–10	50–100	20–80	1–3



Ryc. 6. Rejon badań nachylenia zbocza z zaznaczonymi kierunkami ciągów pomiarowych  
Fig. 6. The area of slope angle measurements with marked directions of measuring profiles

trzenia odbywa się frontalnie, a o parametrach wytrzymałościowych i zachowaniu zbocza decydują strefy o niższych wartościach wskaźnika odbojności.

### Nachylenie koluwiów u podstawy zbocza

Zwietrzały materiał skalny w rejonie projektowanego obiektu gromadzi się na bieżący w formie koluwiów, tworząc ok. 200 m długości podstawę zbocza o wysokości ok. 15–20 m. Zmianę nachyleń uwarunkowanych naturalnym kątem zsywu zwietrzałego materiału skalnego prześledzono wzdłuż trzech horyzontalnie poprowadzonych ciągów pomiarowych, wykonując w górnym ciągu 22 odczyty, w środkowym 33, a w dolnym 41.

Analogicznie do badań odbojności, 52 pomiary nachylenia zbocza wykonano także wzdłuż strumienia Petrified Forest, przedłużając pomiary do rejonu ponad zbiornikiem wody pitnej.

Pomimo zróżnicowanego stopnia zwietrzenia wychodni skał, nachylenie zbocza uformowanych ze zwietrzelin sytuuje się w stosunkowo niewielkim przedziale wartości – średnio 25–30°. W sąsiedztwie projektowanej inwestycji największe kąty zsywu (śr. ok. 30°) występują w górnej części stoku zwietrzelinowego, tam gdzie najpłycej występują skały macierzyste. Środkowa część pionowego profilu zbocza, będąca jednocześnie reprezentatywnym fragmentem badanego odcinka, charakteryzowała się najbardziej jednorodnym nachyleniem (śr. ok. 28°). Dolna część zbocza, gdzie koluwia przechodzą facyalnie w osady podstokowe (deluwia) charakteryzuje się najmniejszymi nachyleniami (śr. ok. 25°).

Zbocze wzdłuż strumienia Petrified Forest jest jeszcze mniej zróżnicowane. Pomiary kąta jego nachylenia nie wykazały istotnych zmian w zależności od miejsca ich wykonywania. Średnie nachylenie zbocza wyniosło ok. 28° (wynik z 52 pomiarów).

Nachylenia skarpy w sztucznym wykopie w ścianie zbocza w rejonie hali magazynowej nr 2 (O16) wykazują, według obserwacji pracowników stacji, wieloletnią stabilność przy uśrednionym kącie ok. 52°. Zachowanie tych ścian stanowi jakościową, obserwacyjną przesłankę wnioskowania o wieloletniej stabilności zbocza zbudowanego z koluwiów/ deluwiów. Wskazuje to na występowanie sił utrzymujących, wynikających ze strukturalnych więzi w materiale zwietrzelinowym.

Nie zaobserwowano tendencji do występowania kołowo-cylindrycznych przemieszczeń osuwiskowych w zboczu

o naturalnym kącie zsywu. Powtarzającym się zagrożeniem będzie natomiast translacja materiału okruchowo-skalnego, która jest uruchamiana po okresie nawalnych opadów deszczu i roztopach pokrywy śniegowej.

### Ocena zagrożeń sejsmicznych

Czynnikiem inicjującym powierzchniowe ruchy masowe oraz możliwe przemieszczenia podłoża pod fundamentami mogą być zjawiska o charakterze fal sejsmicznych generowane endogenicznie. Ten aspekt był już brany pod uwagę podczas prac nad projektem w latach 70. XX w. (Skowron, 2015). Analiza map dna morskiego w rejonie Szetlandów Południowych umożliwiła zaobserwowanie form rzeźby w postaci stożków wulkanicznych. Brak danych dotyczących zagrożenia sejsmicznego w tym rejonie nie pozwala natomiast na ocenę prawdopodobieństwa występowania nadzwyczajnych zdarzeń związanych z bliską aktywnością sejsmiczną dna morskiego. Potencjalne pojawianie się wstrząsów sejsmicznych może generować katastrofalne zagrożenia, wynikające przede wszystkim z bardzo wysokich fal morskich, a także zmiany warunków stateczności na zwietrzałych zboczach. Wieloletnie obserwacje w okresie kilkudziesięciu lat funkcjonowania stacji nie dostarczają przesłanek urealnających te prognozy.

### Skutki abrazji

Na podstawie zdjęć z okresu budowy i eksploatacji Stacji im. H. Arctowskiego oraz relacji ustnych i krótkich obserwacji w czasie wykonywania prac terenowych, należy uświadomić sobie zagrożenia związane ze skutkami falowania morskiego w rejonie głównego budynku bazy, tzw. samolotu. Erozja brzegowa spowodowała w ostatnich 40 latach redukcję obszaru lądowego o ok. 30 m, co w chwili obecnej zagraża bezpieczeństwu istniejącego budynku. Obserwacje autorów potwierdzają także lokalnie występujące silne fale związane z cieleniem się gór lodowych w pobliskiej zatoce. W przeciwieństwie do normalnego falowania wiatrowego „wchodzą” one na ląd z dużą prędkością, na długim odcinku i przy ekstremalnie dużych mechanizmach spustowych (np. gwałtowne cielenie się lub przewrócenie dużej góry lodowej) będą mogły docierać nawet na kilkaset metrów w głąb *plateau*, a więc w rejon nowo projektowanego obiektu. Zagrożeniu temu sprzyja płaski teren całego obszaru stacji o małym zróżnicowaniu wysokości bezwzględnych – ok. 3 m n.p.m.

## WYNIKI BADAŃ LABORATORYJNYCH

Pobrano materiał badawczy zawierający przede wszystkim grunty gruboziarniste (niespoiste o różnorodnym uziarnieniu). Masa pobieranych próbek była dostosowywana do makroskopowo ocenionego uziarnienia tak, żeby w miarę możliwości uzyskiwać reprezentatywne pod względem granulometrycznym opróbowanie. W odkrywkach pomiędzy dużymi fragmentami skał zaliczanymi do gładów dominował materiał niespoisty, przede wszystkim o uziarnieniu odpowiadającym żwirom i pospółkom. Oznaczenia wybranych parametrów przeprowadzono zgodnie z normami PN-B-04481:1988; PN-EN ISO 14688-1:2006; PN-EN ISO 14688-2:2006; PN-EN ISO 14688-2:2006/Ap2:2012, a stosowana symbolika i nazewnictwo odpowiadają normom PN-B-02480:1986, PN-B-02481:1998 oraz PN-EN 1997-2:2009.

Ze względu na oznaczone makroskopowo uziarnienie klasyfikujące rozpoznawane w profilach grunty jako gruboziarniste i bardzo gruboziarniste, ograniczono znacznie zakres pierwotnie zaplanowanych badań. Tylko trzy próbki zaklasyfikowane do grupy gruntów spoistych (drobnoziarnistych) poddano niezwłocznie badaniom wilgotności w laboratorium stacji. Mała miąższość deluwialnych gruntów spoistych w przypadku dwóch próbek i dodatkowo lokalizacja jednej próbki z otworu spoza rejonu planowanego posadowienia sprawiły, że wydzielenia gruntów spoistych nie uznano za istotnie wpływające na ocenę warunków geologiczno-inżynierskich. Nie kontynuowano badań ich parametrów, ograniczając się do oceny granulometrii.

Spośród pobranych próbek gruntów niespoistych wytypowano reprezentatywne, przewidziane do transportu i dal-



**Ryc. 7.** Warstwa bardzo gruboziarnistych gruntów na głębokości ok. 1 m p.p.t. na tle innych gruboziarnistych warstw

**Fig. 7.** A layer of boulders at a depth of 1 m b.g.l. with other coarse-grained soil layers in the background

szych badań granulometrycznych w laboratorium IHiGI Wydziału Geologii Uniwersytetu Warszawskiego. Szczególną uwagę zwrócono na grubookruchowe osady koluwalne, w celu oszacowania procentowego udziału frakcji kamienistej. Dwie próbki gruntów spoistych poddano analizie sedymentacyjnej. Rozmiar i masa frakcji kamienistej umożliwiały jedynie szacunkowe oceny ich udziału w profilu (ryc. 7). Uziarnienie grubych i bardzo grubych okruchów przedstawiono zatem na podstawie określenia wymiarów liniowych w terenie. Należy podkreślić, że w wydzieleniach gruntów bardzo gruboziarnistych masowa dominacja tej frakcji oscyluje na poziomie powyżej 80%. W tej sytuacji wyniki badań laboratoryjnych przedstawiają rozkład uziarnienia materiału stanowiącego wypełnienie, czyli bez uwzględnienia masy kamieni i gładów (tab. 2).

## MODEL GEOLOGICZNY PODŁOŻA I UWARUNKOWANIA PROCESÓW GEODYNAMICZNYCH

Model geologiczny niezbędny do oceny warunków posadowienia musi być rozpatrywany w kontekście zarówno bezpośredniego oddziaływania fundamentów na podłoże, jak i możliwych wpływów otoczenia na planowane obiekty.

Skały napotymane w najbliższym sąsiedztwie Polskiej Stacji Antarktycznej im. H. Arctowskiego należą do formacji zwanej Arctowski Cove, mającej ok. 220 m miąższości (Birkenmajer, 1980). Jest ona bardzo zmienna pod względem budowy oraz składu petrograficznego. Znajdujące się bezpośrednio przy stacji zbocze jest zbudowane ze skał należących do ogniwa Hala zawierającego andezyty wzbogacone w żelazo, lawy bazaltowe, osady piroklastyczne oraz skały osadowe w postaci konglomeratów utworzonych ze skał wulkanicznych. Wiek tego ogniwa jest niepewny i szacowany na 66–37 mln lat (Birkenmajer, 2002).

Wymienione wcześniej pokrywy andezytowe mają barwę od szarej do ciemno szarej i odsłaniają się na zboczu nad planowaną lokalizacją nowego budynku stacji. Ze względu na swoje pochodzenie oraz skład mineralogiczny są to skały charakteryzujące się dużą odpornością na procesy wietrzenia.

Natomiast w położonej nieco na zachód dolinie potoku Petrified Forest obserwuje się w odsłonięciach szaro-brunatne konglomeraty osadowe utworzone ze skał zdeponowanych w środowisku wód płynących oraz z osadów stożków aluwialnych. W skład konglomeratów wchodzi materiał o zróżnicowanym granulometrycznym składzie odpowiadającym mułom, piaskom i żwirom, a także skamieniałe fragmenty roślin. Najwyższa część zbocza przy Stacji im. H. Arctowskiego tworzy ogniwo biorące nazwę od wspomnianego potoku, a jego miąższość wynosi tutaj od 30 do 50 m. W najbliższym sąsiedztwie bazy nie ma odsłonięcia *in situ*, w którym można bezpośrednio obserwować skały należące do opisywanego ogniwa.

W osadach poniżej zbocza, w których wykonywane były odkrywki pod budowę projektowanego budynku, występują fragmenty zerodowanych skał z ogniwa Hala oraz czarne piaski morskie o dobrym wysortowaniu. Piaski te mają makroskopowo podobny skład mineralogiczny do formacji wulkanicznych z tego obszaru. Sporadycznie w odsłonięciach napotymano na fragmenty skał z ogniwa Petrified Forest, które są znacznie mniej odporne na wietrzenie.

Fragment skamieniałego drzewa rozpoznano m.in. w odkrywcę O8. Opisujące osady mogą również zawierać fragmenty skał z najwyższego ogniwa Arctowski Cove – Skua Cliff. Są one bardzo podobne, zarówno makroskopowo, jak i petrograficznie, do tych pochodzących z ogniwa Hala.

Model geologiczny podłoża projektowanego obiektu tworzą głównie słabo obtoczone osady grubo- i bardzo grubo-okruchowe. Zaobserwowano także ostrokrawędziste fragmenty skał związane z bliskim sąsiedztwem strome go, wysokiego zbocza.

Występujące na płaskim *plateau*, w podłożu projektowanego obiektu, grunty zakwalifikowano umownie jako litoralne, gdyż pierwotny materiał zwietrzelinowy pochodzący głównie ze stoków był wielokrotnie przerabiany w strefie przybrzeżnej oraz przez działalność abrazyjną. Na podstawie archiwalnych materiałów umożliwiających rozpoznanie budowy geologicznej terenu badań (Birkenmajer, 1980; 2002) oraz własnych obserwacji skutków abrazyji założono, że rozpoznawane w profilach pakiety zawierające obtoczony materiał skalny, a także pokrywy złożone z ciemnych piasków i żwirów, przypominają nadbrzeżne osady plażowe. Koluwia i/lub deluwia często zazębiają się facjalnie z osadami o cechach litoralnych, nawet w profilach najbardziej oddalonych od zbocza – w rejonie mszarnika (np. O5).

W części przypowierzchniowej do głębokości ok. 0,3 m występują grunty piaszczyste, a lokalnie spoiste, które z uwagi na ich płytkie położenie nie będą stanowić podłoża fundamentów. Na obszarze badań w rejonie projektowanego obiektu oraz w rejonie zbiornika wody pitnej nie rozpoznano uznawanych za słabonośne, gruntów organicznych. Grunty spoiste z przypowierzchniowej strefy (do 0,3 m w otworze O5) występowały w stanie plastycznym. W pozostałych punktach dokumentacyjnych przy powierzchni terenu rozpoznawano grunty gruboziarniste z domieszkami gliniastymi. Poniżej głębokości 0,5 m, poza wspomnianymi przy oznaczeniach wilgotności naturalnej trzema próbkami gruntów spoistych (drobnoziarnistych), stwierdzano obecność tylko gruntów zaliczanych do niespoistych, głównie żwirów i pospółek z kamieniami oraz głazami. Koluwia złożone z grubo- i bardzo gruboziarnistego materiału są lokalnie gliniaste. Rozmiar kamieni i otoczków uniemożliwiało zbadanie stopnia zagęszczenia metodami *in situ*. Eksperycko, bezpieczny stopień zagęszczenia osadów piaszczysto-żwirowych oceniono na  $I_D = 0,6$ , a w warstwach kamieni i otoczków zagęszczenie może być przyjmowane jako większe ( $I_D$  rzędu 0,8).

Warunki geologiczno-inżynierskie w rejonie projektowanej inwestycji uznano za dobre. Poniżej wierzchniej strefy gruntowej, narażonej na oddziaływanie pogodowe, od głębokości 0,5 m grunty uznaje się jako nośne na potrzeby projektowanej inwestycji. Przy określaniu w podłożu naprężeń efektywnych oraz ciśnień sphywowych należy uwzględniać szybkozmienne wahania zwierciadła wód gruntowych wynikające z hydraulicznych oddziaływań pływów morskich w pobliskiej zatoce. Na znaczną dynamikę tych zmian wskazują także bardzo duże wartości współczynnika filtracji, szacowane w analizowanych gruntach na więcej niż 100 m/d. Przyjęte założenia konstrukcyjne, dotyczące przenoszenia obciążeń na 40 podstaw fundamentowych, wskazują, że warunki nośności w analizowanym podłożu gruntowym nie zostaną przekroczone.

Osiadania w wyniku posadowienia konstrukcji nastąpią bezpośrednio po przyłożeniu obciążeń, a znikomy udział w podłożu gruntów spoistych będzie skutkował brakiem opóźnienia konsolidacyjnego. Odkształcalność podłoża może być lokalnie zwiększona w przypadku generowania filtracyjnych deformacji gruntu w warunkach szybkich i znacznych zmian dynamiki wód gruntowych. W świetle przeprowadzonych badań granulometrycznych ewentualne zagrożenia tego typu mogą dotyczyć przede wszystkim tych części podłoża, w których dominują pospółki.

Podczas badań w okresie letnim nie zaobserwowano wiecznej zmarzliny, której występowania nie potwierdzają również archiwalne publikacje. Analiza temperatur w okresie zimowym na podstawie przesłanek literaturowych (m.in. Kruszewski, 1998) wskazuje na występowanie zjawiska przemarzania w miesiącach zimowych i ujemne temperatury wody w zatoce (Rakusa-Suszczewski, 1995). Pomimo braku danych pomiarowych należy przyjąć, że przemarzanie obejmuje strefę, na której zakłada się posadowienie bezpośrednie fundamentów, a więc głębokość 50 cm. Takie założenia przy braku znajomości warunków gruntowo-wodnych były również podejmowane przy projekcie stacji w latach 70. XX w. (Skowron, 2015). Incydentalne występowanie cienkich wkładek gruntów spoistych, a także hydrodynamika pływowa, wskazują na praktycznie znikome zagrożenie wynikające z wysadzinowości.

Zbocze w rejonie projektowanej inwestycji uznano za stabilne strukturalnie. Wieloletnie obserwacje nie potwierdzają występowania mechanizmu osuwisk o kołowo-cylindrycznej powierzchni poślizgu. Obecnie jest zachowany naturalny kąt zsypania materiału okruchowego. Stateczność tej pokrywy nie jest na ogół naruszana. Fragment zbocza ze zwiększonym „sztucznie” kątem nachylenia w niedalekim wyrobisku (przy hali magazynowej nr 2 – O16) od ponad 10 lat także nie stracił stateczności w tych samych warunkach atmosferycznych. Zagrożeniem dla projektowanego obiektu mogą być zsuwy i osypiska materiału okruchowo-zwietrzelinowego, w szczególności po nawalnych deszczach, roztopach pokrywy śniegowej oraz w związku z rozwojem procesów wietrzenia intensyfikowanych niekorzystnymi oddziaływaniami klimatycznymi.

Projekt koncepcyjny (Kuryłowicz & Associate, 2015) zakłada posadowienie budowli bezpośrednio lub z zastosowaniem mikropali. Udokumentowana analiza warunków gruntowo-wodnych nie wyklucza żadnej z powyższych propozycji. Ze względu na występowanie w modelu geologicznym warstw bardzo grubookruchowych (kamieni i obtoczonych głazów), w przypadku zastosowania technologii mikropali, należy liczyć się z nadmierną ucieczką iniektu w przestrzeń porową bardzo przepuszczalnych gruntów. Prowadzenie prac fundamentowych w wykopach będzie wymagało lokalnego odwodnienia terenu do poziomu 10–20 cm poniżej dna wykopu. Ze względu na wymagania ochrony środowiska w rejonie stacji, odwodnienie należy prowadzić punktowo (nie obszarowo) tak, żeby nie spowodować osuszenia terenu mszarnika, przylegającego do miejsca posadowienia.

Podnóże zbocza, na którym występują powierzchniowe ruchy masowe wymaga w rejonie obiektu dodatkowego zabezpieczenia. Zwyczajowe zastosowanie w takim przypadku wbijanych, stalowych elementów (np. ścianki typu Larsena) będzie utrudnione ze względu na opór przy wbija-



niu, szczególnie przez poziomy kamieniste w podłożu. Optymalnym rozwiązaniem ze względu na warunki geologiczne wydaje się być mała murowana lekka konstrukcja posadowiona w gruncie na głębokości odpowiadającej wystąpieniu grubookruchowych fragmentów zwietrzelin, lecz nie głębiej niż poziom zwierciadła wody gruntowej. Konstrukcja taka powinna być od strony zbrocza zaopatrzona w drenaż przeciwdziałający powstawaniu nadmiernych ciśnień spływowych. Celem takiego zabezpieczenia byłoby zatrzymywanie osypującego się materiału, a następnie jego sukcesywne usuwanie redukujące parcie na konstrukcję.

## WNIOSKI

Przeprowadzone rozpoznanie najistotniejszych uwarunkowań geologiczno-inżynierskich w rejonie Polskiej Stacji Antarktycznej im. H. Arctowskiego pozwala na sformułowanie zgeneralizowanych wniosków o charakterze metodycznym oraz zaleceń praktycznych:

1. Lokalizacja planowanego obiektu oraz warunki gruntowo-wodne wymuszają zindywidualizowane podejście projektowe, zwłaszcza ze względu na brak doświadczeń porównywalnych w zakresie dokumentowania i projektowania. W geologiczno-inżynierskim podejściu dokumentacyjnym niezbędne jest uwzględnienie geodynamicznych uwarunkowań klimatycznych i hydrologicznych. Ocena warunków gruntowo-wodnych do celów projektowych nie może wynikać wyłącznie z ustandaryzowanych przepisów i procedur, lecz powinna być dostosowana do potrzeb wynikających ze szczególnej specyfiki terenu oraz geośrodowiskowych zagrożeń w relacji do projektowanego obiektu inżynierskiego.

2. Wybór opcji posadowienia obiektu powinien być poprzedzony jakościowymi obserwacjami i rozpoznaniem geologicznym, jako kluczowymi elementami ukierunkowania nietypowej oceny warunków geologiczno-inżynierskich. Wybrane właściwości gruntów, skał, warunki geomorfologiczne oraz inne czynniki abiotyczne powinny mieć istotne znaczenie w określaniu ostatecznego rozwiązania projektowego obiektu inżynierskiego.

3. Warunki gruntowo-wodne umożliwiają realizację projektowanego obiektu. W jego podłożu można wyróżnić następujące zespoły gruntowe:

- grubookruchowe głązy i kamienie występujące często w postaci nieciągłych, zmiennych poziomów dokumentowanych w profilach odkrywek; przestrzeń między nimi jest wypełniona drobniejszym materiałem zwirowym i piaszczystym, niekiedy z wkładkami spoistymi o możliwym uplastycznieniu;

- poziomy zwirowo-piaszczyste, pospółki i pospółki gliniaste;

- koluwia i deluwia o bardzo zmiennym składzie granulometrycznym zawierającym duże, kilku lub kilkudziesięciocentymetrowe fragmenty skalne z dominującym jednak udziałem materiału drobniejszego: pospółek, zwirow, piasków i wtrąceń gliniastych.

4. Ze względu na lokalne warunki klimatyczne profil wietrzeniowy wszystkich wychodni skał w rejonie Stacji im. H. Arctowskiego będzie ulegał sukcesywnym zmianom. Proces wietrzenia jest obserwowany sukcesywnie i związany z cyklem zjawisk hydrologiczno-meteorolo-

gicznych. Największe znaczenia mają częste „przejścia” przez temperaturę 0°C. Dodatkowym czynnikiem wietrzeniowym jest intensywna korazja powierzchni skalnych, wynikająca z występowania wiatrów szkwałowych dochodzących do 290 km/h. Na charakter procesu wietrzenia oddziałuje też specyfika składu chemicznego wód deszczowych, wynikająca z obecności aerozoli podrywanych przez wiatry szkwałowe z zaslonej Zatoki Arctowskiego.

5. Abrazja stanowiła i będzie stanowiła w przyszłości potencjalne zagrożenie funkcjonowania wznoszonych obiektów. Ekstrapolacja tempa procesów abrazyjnych wskazuje na bezpieczne perspektywy funkcjonowania nowego, projektowanego obiektu w szacowanym okresie co najmniej 50 lat.

6. Ocena aktualnego stanu zbrocza na zapleczu stacji wskazuje na jego stabilność, której ewentualne zmiany mogą być implikowane trudnymi do prognozowania, zarówno w skali, jak i czasie, nadzwyczajnymi zjawiskami sejsmicznymi lub hydrodynamicznymi.

Autorzy serdecznie dziękują Recenzentom za uwagi oraz uzupełnienia, które przyczyniły się do poprawy i czytelności treści artykułu.

## LITERATURA

- BIRKENMAJER K. 1980 – Geology of Admiralty Bay, King George Island (South Shetland Islands) – An outline. Polish Polar Research, Polskie Badania Polarne, 1 (1): 29–54.
- BIRKENMAJER K. 2002 – Admiralty Bay, King George Island, South Shetlands Island, West Antarctica, Geological Map 1 : 50 000.
- KRUSZEWSKI G. 1998 – Temperatura gruntu na stacji im. H. Arctowskiego w roku 1995. Wyprawy Geograficzne na Spitsbergen, IV Zjazd Geomorfologów Polskich, UMCS, Lublin 3–6 czerwca 1998.
- KURYŁOWICZ & ASSOCIATES 2015 – Projekt koncepcyjny wielobranżowy polskiej stacji antarktycznej im. H. Arctowskiego na Wyspie Króla Jerzego.
- PN-B-02480:1986 – Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów.
- PN-B-04481:1988 – Grunty Budowlane. Badania Próbek Gruntu.
- PN-B-02481:1998 – Geotechnika. Terminologia podstawowa, symbole literowe i jednostki miar.
- PN-EN 1997-2: 2009 – Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne – Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego.
- PN-EN ISO 22475-1:2006 – Rozpoznanie i badania geotechniczne – pobieranie próbek metodą wiercenia i odkrywek oraz pomiary wód gruntowych – Część 1: Techniczne zasady wykonania (oryg.).
- PN-EN ISO 14688-1:2006 – Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 1: Oznaczanie i opis.
- PN-EN ISO 14688-2:2006 – Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania.
- PN-EN ISO 14688-2:2006/Ap2:2012 – Załącznik krajowy do Polskiej Normy. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania.
- RAKUSA-SUSZCZEWSKI S. 1995 – The hydrography of Admiralty Bay and its inlets, coves and lagoons (King George Island, Antarctica). Polish Polar Research, 16 (1/2): 61–70.
- ROZPORZĄDZENIE Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 25 kwietnia 2012 r. w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych. Dz.U. z 2012 r. poz. 463.
- ROZPORZĄDZENIE Ministra Środowiska z dnia 8 maja 2014 r. w sprawie dokumentacji hydrogeologicznej i geologiczno-inżynierskiej. Dz.U. z 2014 r. poz. 596.
- SKOWRON M. A. 2015 – Polacy na szóstym kontynencie. Budowlana „randka w ciemno”. Inżynier Mazowska. Dwumiesięcznik Mazowieckiej Okręgowej Izby Inżynierów Budownictwa nr 5 (57).
- USTAWA z dnia 9 czerwca 2011 roku Prawo geologiczne i górnicze. Dz.U. z 2015 r. poz. 196 z późn. zm.
- USTAWA z dnia 7 lipca 1994 Prawo budowlane. Dz.U. z 2013 r. poz. 1409 z późn. zm.