

OPINIA GEOTECHNICZNA

**do ekspertyzy na temat przyczyn katastrofy
budowlanej z dnia 11 maja 2017 r.
w pomieszczeniach usytuowanych po
wschodniej stronie klatki schodowej – wejście B
skrzydła północnego Zamku Książąt
Pomorskich
przy ul. Korsarzy 34 w Szczecinie,
woj. zachodniopomorskie**

Zlecniodawca:

Projektowanie, Nadzory, Ekspertyzy Budowlane

inż. Stanisław Kamiński

Ul. Zajęcza 14k

70-795 Szczecin

	Imię i Nazwisko	Stanowisko	Nr uprawnień	Podpis
Opracował:	mgr Marek Ober	Geolog, członek zarządu	070947	

Szczecin, wrzesień 2019

1. Opis wykonanych badań

W dniu 11 lutego wykonano 4 sondowania (nr 1 – 4) mechaniczną sondą DPL wg PN-EN 1997-2 i EN ISO 22476-2 (stożek o średnicy 30 mm na żerdziach 22 mm, masa młota 10 kg), rozpoczynając wbijanie z dna zapadliska w bezpośrednim sąsiedztwie filara, tj. od głębokości 3,0 – 5,2 m poniżej posadzki piwnicy. Sondowania te wykazały stosunkowo mały opór wpędu, dzięki czemu osiągnięto głębokość 8,0 – 13,0 m, kończąc badanie po przekroczeniu wartości $N_{10} = 50$ (ilość uderzeń młota na 10 cm wpędu stożka i żerdzi sondy). Ponieważ część energii uderzenia młota ulegała rozpraszaniu wskutek drgań i ew. wyboczeń niepodpartych gruntem żerdzi, nie sposób sondowań tych interpretować zgodnie z propozycjami norm PN-EN 1997-2 lub PN-B-04452, wykazały one jednak wyraźne osłabienie podłoża zapadniętego filara.

W dniu 21 lutego w miejscu trzech sondowań DPL (nr 1, 3 i 4, przy NW, SW i SE narożu filara) wykonano otwory – sondowania próbnikiem przelotowym RKS o średnicy zewnętrznej od 60 do 36 mm (zmniejszanej w miarę wzrostu głębokości), wbijając go młotem spalinowym WACKER-NEUSON. Osiągnięto głębokość 9,0 – 13,0 m poniżej posadzki, wierceniami objęto więc cały zakres głębokości sondowań DPL, w punktach nr 1 i 3 sięgając 0,1 – 1,0 m głębiej. Poniżej materiału ewidentnie nasypowego (humus, gruz, itp.) w otworach występowały czyste grunty mineralne, pod względem litologicznym ściśle odpowiadające gruntom znanym z archiwalnych otworów wykonanych zarówno przed, jak i po katastrofie, na zewnątrz budynku po obu jego stronach.

W dniu 4 marca wykonano w odległości 3,7 m od NW naroża zapadniętego filara sondowanie mechaniczną sondą DPM (punkt nr 5). Mimo większej energii uderzenia (młot o masie 30 kg, przy stożku jak w sondzie DPL, jednak na żerdziach o średnicy 32 mm), osiągnięto jedynie głębokość 8,0 m, nie stwierdzając istotnego osłabienia gruntu.

Kolejne badania prowadzono w dniach 21 - 22 marca, wykonując przede wszystkim na zewnątrz budynku dwa wiercenia mechaniczne świdrem ślimakowym o średnicy 130 mm (otwory nr 6 i 8) do głębokości 12,0 – 22,5 m poniżej powierzchni terenu po północnej stronie skrzydła, oraz jedno wiercenie do 9,0 m p.p.t. na dziedzińcu przy skrzydle zachodnim (otwór nr 9). Otwór nr 6 miał na celu sprawdzenie, czy stwierdzone we wnętrzu osłabienie podłoża sięga poza fundament ściany północnej. Zjawiska takiego nie zaobserwowano. Otwory nr 8 i 9 przypadały w miejscach anomalii wskazanych na podstawie badań geofizycznych (sejsmicznych), które miały być budowlami podziemnymi z okresu II wojny światowej – oba ww. otwory nie potwierdziły istnienia tego rodzaju elementów.

W dniu 22 marca wykonano ponadto świdrem ręcznym wiercenie penetracyjne nr 7 z dna wykopu po rozbiórce filara (wykop ten osiągnął ostatecznie głębokość ok. 6,3 m poniżej posadzki piwnicy). Ponieważ wykop był jeszcze niezabezpieczony, wiercono z pomostu ułożonego na posadzce, co pozwoliło osiągnąć głębokość jedynie 2,9 m w gruncie (10,0 m poniżej wierzchu pomostu).

W dniu 8 kwietnia prace objęły otwór nr 10, wiercony świdrem penetracyjnym z dna oszalowanego już wykopu do głębokości 8,5 m. Wobec braku w wynikach dotychczasowych badań jakichkolwiek przesłanek wskazujących na przyczynę powstania zapadliska, a obserwując jedynie jego skutki (częściowe osłabienie i niewątpliwe przemieszczanie warstw gruntów spoistych i piasków), zdecydowano

skupić się na stwierdzeniu, jak daleko zjawiska te sięgają od ścian zapadliska. Zaplanowano w związku z tym wykonanie czterech kolejnych otworów (sondowań RKS) po trzech stronach zapadliska (W, S i E; otwory nr 11, 12 i 13), oraz dodatkowo na przedłużeniu stwierdzonego poszerzenia jego dna w kierunku północno - zachodnim (otwór nr 14).

W dniu 25 kwietnia, wykonano otwory nr 11 i 14, natrafiając w obu punktach na mur ceglany na zaprawie wapiennej na głębokości odpowiednio 10,95 i 11,30 m poniżej posadzki; tj. na rzędnych 9,75 i 9,45 m n.p.m. Dzięki użyciu na tej głębokości próbnika przelotowego o najmniejszej średnicy, udało się wbić go w mur na głębokość 20 – 25 cm. Pobrano próbki cegły i zaprawy i przekazano do Laboratorium.

Kolejne otwory nr 12, 13 i 15 wykonano w dniach 16 – 17 maja, osiągając w pierwszym z nich głębokość 13,0 m, natomiast w otworze nr 13 przy wyciąganiu próbnika z głębokości 8,0 m, zerwaniu uległ łącznik żerdzi, co uniemożliwiło kontynuację wiercenia. Otwór nr 15 z powodu braku postępu zakończono na głębokości 6,0 m poniżej posadzki.

W dniach 16 – 17 maja podjęto również próbę rozwiercenia otworu nr 14 do średnicy umożliwiającej wykonanie przewiertu ceglanego muru za pomocą wiertnicy do betonu. Nad otworem ustawiono trójnog wiertniczy, po czym rozpoczęto wiercenie świdrem rurowym dwunożowym w rurach osłonowych o średnicy 167 mm. Wskutek natrafienia na zalegający na głębokości 4,1 m duży głaz, pomimo przestawienia otworu o 0,30 m nie udało się uzyskać większej głębokości. Bliskość wykopu i zapadliska po rozebranych filarze z jednej strony, a konstrukcji wspierającej resztki sklepienia z drugiej, uniemożliwiły przestawienie otworu na większą odległość.

W celu uzyskania informacji o budowie i stanie podłoża muru przewierconego w otworze nr 14, w dniu 15 lipca wykonano z dna tego otworu sondowanie DPL, stwierdzając zasięg strefy gruntu rozmytego podawaną na dno odwiertu wodą do głębokości 13,5 m (tj. 1,7 m poniżej spodu konstrukcji ceglanej); głębiej opór wpędu stożka sondy szybko wzrastał, wskutek czego sondowanie zakończono na głębokości 14,5 m (2,7 m poniżej spodu konstrukcji ceglanej).

Badania w otworze nr 14 kontynuowano w dniu 13 sierpnia, pogłębiając go świdrem penetracyjnym o średnicy 80 mm, najpierw z końcówką rurową dwunożową a następnie z końcówką okienkową. Po pokonaniu strefy rozmycia stwierdzono, że od głębokości 13,5 m podłoże buduje twardoplastyczny piasek gliniasty, na głębokości 14,0 m podścielony gliną pylastą o konsystencji twardoplastycznej, bliskiej półzwartej.

W ostatnim etapie badań w dniu 4 września wykonano na SW od wykopu za pomocą próbnika RKS otwór nr 16 do głębokości 12,0 m. Celem tego otworu było sprawdzenie, jak daleko od rozebranego filara sięga obszar gruntów przemieszczonych i osłabionych wskutek powstania zapadliska.

W poniższej tabeli zestawiono głębokości wykonanych w kolejnych etapach badań otworów i samodzielnych sondowań, a także osiągnięte w nich rzędne. Pogrubioną czcionką wyróżniono otwory

wykonane w piwnicy pionu, gdzie doszło do katastrofy, brak pogrubienia oznacza otwory wykonane na zewnątrz budynku, kursywą podano dane dotyczące samodzielnego sondowania DPM.

Nr otworu	Rzędna otworu (m n.p.m.)	Głębokość (m p.p.t.)	Rzędna, na której zakończono otwór (m n.p.m.)	Głębokość otworu poniżej poziomu posadowienia skrzydła N (m)
1	20.70	11.50	9.20	10.40
2	20.76	9.5	11.26	8.34
3	20.75	9.0	11.75	7.85
4	20.78	13.0	7.78	11.82
5	20.73	8.0	12.73	6.87
6	24.16	22.5	1.66	17.94
7	21.09	10.0	11.09	8.51
8	24.27	12.0	12.27	7.33
9	24.01	9.0	15.01	4.59
10	14.18	8.5	5.68	13.92
11	20.70	11.2	9.50	10.10
12	20.74	13.0	7.74	11.86
13	20.68	7.0	13.68	5.92
14	20.75	11.8	9.25	10.35
15	20.75	12.4	8.35	11.25
16	20.78	12.0	8.78	10.82

Z uwagi na sposób wierceń nie można było badać gruntów spoistych metodą ścinań bez filtracji wody krzyżakową końcówką sondy FVT lub SLVT, z otworów nr 6, 7, 10 – 14 i 16 pobrano więc 35 próbek gruntów o naturalnej wilgotności (klasa 3 wg PN-EN 1997-2). Dla dwóch próbek wykonano analizy uziarnienia, a dla 32 próbek gruntów spoistych oznaczono wilgotność naturalną, oraz granicę konsystencji (dla 11 próbek).

Na podstawie wykonanych wierceń i sondowań opracowano przekroje geotechniczne I – VIII, obrazujące bez przewyższenia (w skali poziomej i pionowej 1:100) budowę geologiczną podłoża miejsca katastrofy budowlanej. Do przekrojów I, II i VIII włączono profile otworów archiwalnych (dwa z nich to kompilacja par otworów firmy GCO z dwóch różnych etapów badań). Przekrój I przedłużono ku północy do podstawy skarpy, począwszy od otworu nr 1A/N włączając do niego duży fragment przekroju VIII z archiwalnej dokumentacji geologiczno – inżynierskiej dla projektu kompleksowego zagospodarowania tarasów Zamku, opracowanej w grudniu 2015 r. przez BARG-ARTGEO Sp. z o.o. (M. Ober). W przekroju tym zestawiono wyłącznie wcześniejsze otwory archiwalne, wykonane w 2010 r. przez „GEOPROJEKT Szczecin” (nr 7/G, 8/G i 9/G), oraz w 2012 r. przez firmę N-GEO Michał Niedziółka ze Szczecina (otwory nr 1/N i 1A/N). Zachowano przy tym zastosowany w dokumentacji z 2015 r. podział geotechniczny wraz z wartościami stopnia zagęszczenia i wskaźnika konsystencji gruntów poszczególnych warstw. Numery warstw archiwalnych i wartości I_D/I_c wyróżniono kolorem zielonym. Przekrój I przedstawia dzięki temu sytuację miejsca katastrofy budowlanej w kontekście skarpy tarasu północnego. Podstawa skarpy w linii przekroju I przypada na rzędnej 11,60 m n.p.m.. Wykorzystane w dokumentacji archiwalnej wcześniejsze otwory były płytkie, wskutek czego obejmują podłoże skarpy do głębokości 3,0 – 8,0 m p.p.t. Do przekroju VIII włączono profil otworu nr 4/Ag, wykonanego przez firmę ArtGeo Marek Ober w czerwcu 2012 r. dla opracowania p.t.: „Opinia o warunkach geotechnicznych w podłożu posadzki piwnic we wschodniej części północnego skrzydła

Zamku Książąt Pomorskich w Szczecinie”. Opinię tę wykonano dla potrzeb ekspertyzy dotyczącej spękanej i osiadającej posadzki piwnic pionu objętego późniejszą katastrofą budowlaną.

2. Budowa geologiczna, warunki hydrogeologiczne i właściwości geotechniczne podłoża

2.1 Budowa geologiczna podłoża

Poniższy opis dotyczy budowy geologicznej podłoża pionu objętego katastrofą budowlaną i jego najbliższego sąsiedztwa. Pominęto w związku z tym rozpoznane jedynie otworami archiwalnymi podłoża skarpy tarasu północnego, oraz profil oddalonego od miejsca katastrofy o 45 m otworu nr 9, który trafić miał na domniemany podziemny schron.

Należy w tym miejscu krótko scharakteryzować sytuację geomorfologiczną Zamku, gdyż określa ona budowę geologiczną jego podłoża. Zamek położony jest bowiem na wysuniętym ku wschodowi fragmencie falistej wysoczyzny morenowej o rzędnych ok. 20 – 25 m n.p.m., ograniczonym od SE, a także od NE i od SW stromymi krawędziami o charakterze skarp. Skarpa SE opada wprost ku szerokiej dolinie dolnej Odry, której dno w stanie naturalnym nie przekraczało rzędnej ok. 1,0 – 1,5 m n.p.m., natomiast pozostałe dwie skarpy to zbocza rozcinających krawędź wysoczyzny dolin erozyjnych. W związku z trwającym w tym rejonie od ok. IX w. osadnictwem, a w szczególności wskutek budowy grodu, a następnie zamku, naturalna krawędź uległa daleko idącym przekształceniom antropogenicznym. Przekształcenia te polegały z jednej strony na nadbudowaniu naturalnej powierzchni terenu (także dna doliny) grubą pokrywą nasypów, z drugiej strony na wkopaniu w zbocze tylnych części oficyn i budynków gospodarczych usytuowanych u podnóża skarp. Przez obecną skarpe tarasu północnego zamku przebiegał w średniowieczu mur miejski.

Na podstawie wykonanych wierceń, sondowań i badań laboratoryjnych, a także analizy materiałów archiwalnych i kartograficznych stwierdzono, że rodzime podłożo objętego badaniami pionu tworzą plejstocenyjskie utwory zwałowe i głębiej wodnolodowcowe. Na gruntach rodzimych zalegają nasypy o zróżnicowanej miąższości, będące w znacznej części nasypami kulturowymi, w najpłytszych partiach powstały jednak wskutek zniszczenia Zamku podczas II wojny światowej (głównie wskutek nalotów w 1944 r.), a następnie jego wieloletniej odbudowy.

Utwory wodnolodowcowe budują najgłębsze partie objętej badaniami strefy, zalegając poniżej głębokości 20,0 m p.p.t. (tj. rzędnej 4,16 m n.p.m.) w otworze nr 6, oraz poniżej 20,4 – 21,7 m p.p.t. w otworach z drugiego etapu badań firmy GCO. W otworze nr 6 są to kolejno piaski grube (CSa wg PN-EN 1997-2) o miąższości 0,5 m, piaski drobne (FSa wg PN-EN 1997-2) o miąższości 0,9 m, oraz piaski średnie (MSa wg PN-EN 1997-2) o miąższości ponad 1,1 m. W otworach GCO są to piaski średnie i niekiedy w partii stropowej piaski drobne. Wodnolodowcowych piasków nie przewiercono w otworze nr 6 do głębokości 22,5 m p.p.t. a w otworach GCO do 23,5 – 25,0 m p.p.t.

Na wodnolodowcowych piaskach leży gruba seria utworów zwałowych – osadów budujących wysoczyznę morenową, akumulowanych podczas ostatniego zlodowacenia. Pod względem litologicznym utwory zwałowe dzielą się na dwie odmienne serie – zwałowe grunty spoiste i grunty niespoiste.

W związku z postawioną hipotezą o istnieniu pustki (podkopu) w obrębie utworów zwałowych wydzielono ponadto dwie grupy gruntów – grunty genezy zwałowej przemieszczone grawitacyjnie oraz zalegające *in situ*. Podstawę dla takiego rozróżnienia obok różnic litologii i stanu gruntów w miejscu zapadniętego filara i w jego otoczeniu oraz obserwacji kształtu zapadliska i gruntów budujących jego ściany, stanowiły także wyniki badań georadarowych z dnia 30 kwietnia 2019 r., wskazujące na obecność w otoczeniu zapadliska koncentrycznych stref ścięcia gruntów. Głębokość przemieszczeń grawitacyjnych podłoża nie przekracza ok. 13,7 m poniżej posadzki piwnicy, całość zaliczonych do tej grupy gruntów należy więc do osadów genezy zwałowej.

Utwory zwałowe występują we wszystkich otworach wykonanych dla niniejszej ekspertyzy a także we wszystkich włączonych do przekrojów geotechnicznych profilach otworów archiwalnych (łącznie w 20 otworach). Na grunty przemieszczone grawitacyjnie natrafiono w 10 otworach w obrębie i najbliższym sąsiedztwie zapadliska (nr 1, 3, 4, 7 i 10 – 15), przy czym w pięciu otworach (nr 1, 3, 7, 11 i 13) gruntów tych nie przewiercono do głębokości 7,0 – 11,5 m (tj. do rzędnych 9,20 – 13,68), natomiast w otworach nr 4, 10, 12 i 14 ich spąg występował na głębokości 6,5 – 13,5 m, tj. na rzędnych 7,25 – 11,04 m n.p.m. a poniżej zalegały grunty *in situ*. Łączna miąższość gruntów przemieszczonych (spoiстых i niespoistych) w poszczególnych profilach waha się od ponad 2,9 m w otworze nr 7, do ponad 9,0 m w otworze nr 11.

Grunty spoiste budują przeważającą część utworów zwałowych zarówno w grupie gruntów przemieszczonych grawitacyjnie, jak i w grupie gruntów zalegających *in situ*. Są to najczęściej piaski gliniaste (clsiSa wg PN-EN 1997-2, w otworach nr 1, 3, 4, 6 - 8, 10 - 16, oraz w otworach archiwalnych nr 4/Ag, B3/GCO1, B5/GCO1, B6/GCO1 i B2+B5/GCO), rzadziej gliny piaszczyste (saCl wg PN-EN 1997-2, w otworach nr 1, 4, 6, 10 – 12, 14, 16, oraz archiwalnych nr B3/GCO1, B4+B3/GCO, B6/GCO1 i B2+B5/GCO). Tylko w otworze nr 14 na głębokości 14,0 m p.p.t. natrafiono na glinę pylastą (sacLSi wg PN-EN 1997-2) a w archiwalnych otworach nr B3/GCO1 i B5/GCO1 na pyły (Si wg PN-EN 1997-2). Miąższość poszczególnych stref zalegania gruntów spoistych przemieszczonych wynosi od 0,5m do 8,6 m (najwięcej w otworze nr 12), w przypadku gruntów *in situ* waha się od 0,7 do 13,7 m (najwięcej w otworze nr 6). Ilość stref gruntów spoistych w poszczególnych profilach dochodzi do trzech dla gruntów przemieszczonych (otwory nr 10 i 11). W obrębie gruntów *in situ* w otworze archiwalnym nr B3/GCO1 występują aż cztery strefy gruntów spoistych.

Zwałowe grunty niespoiste budują śródglinowe warstwy i lokalne płyty pokrywy na gruntach spoistych, występując w 6 otworach w gruntach przemieszczonych grawitacyjnie (nr 1, 4, 6, 10, 11 i 14) oraz w 7 otworach w obrębie gruntów *in situ* (nr 6, 8, B3/GCO1, B4+B3/GCO, B5/GCO1, B6/GCO1 i B2+B5/GCO). Są to najczęściej piaski drobne (FSa wg PN-EN 1997-2), niekiedy z domieszką żwiru (grFSa) lub na pograniczu piasku średniego (FSa/MSa) a także piaski ilaste (clSa wg PN-EN 1997-2) i podrzędnie piaski średnie (MSa wg PN-EN 1997-2). Miąższość poszczególnych warstw zwałowych piasków jest znacznie mniejsza niż gruntów spoistych i wynosi 0,2 – 1,5 m w grupie gruntów przemieszczonych i 0,4 – 3,6 m w grupie gruntów *in situ*. Ilość stref zalegania piasków w poszczególnych profilach nie przekracza z reguły dwóch, tylko w archiwalnym otworze nr B3/GCO1 występują aż cztery takie strefy (wszystkie w obrębie utworów zwałowych *in situ*).

Na utworach zwałowych zalegają nasypy niekontrolowane (Mg wg PN-EN 1997-2), w głębszych partiach będące nasypami kulturowymi. Miąższość nasypów we wnętrzu piwnicy w otoczeniu zapadliska (otwory nr 12 i 16) wynosi 1,2 – 20 m, w obrębie zapadliska (otwory nr 1, 3, 4, 10 11, 13, 14 i 15) 0,2 – 2,6 m a w otworach na zewnątrz budynku, na tarasie północnym, (otwory nr 6 i 8) 4,8 – 5,0 m. Na dziedzińcu zamkowym w archiwalnych otworach firmy GCO miąższość nasypów wynosi 4,7 – 6,4 m. Nasypy w przewadze złożone są humusu piaszczystego [Mg(saOr)], podrzędnie z piasku humusowego (jedynie w partiach o miąższości 0,2 – 1,4 m), w otworach archiwalnych GCO na dziedzińcu ich partie spągowe o miąższości 2,3 – 4,3 m złożone są z mierzwy.

W otworach nr 11, 14 i 15 na głębokości odpowiednio 10,95, 11,30 i 11,40 m poniżej posadzki piwnicy natrafiono na ceglany mur, którego górna krawędź zalega na rzędnych 9,35 – 9,75 m n.p.m. a mierzona w pionie grubość w otworze nr 14 wynosi 0,5 m (w otworze nr 15 - z powodu braku możliwości technicznych - mur nie został przewiercony do głębokości 12,4 m poniżej posadzki, tj. 1,0 m poniżej górnej krawędzi). Otwory, w których stwierdzono mur, zlokalizowane są w obrębie dawnego NW przęsła sklepienia a odległości między nimi wynoszą 2,85 m (otwory nr 11 i 14), 3,40 m (otwory nr 11 i 15) oraz 3,30 m (otwory nr 14 i 15). Ceglany mur jest wprawdzie artefaktem i w zasadzie nie wchodzi w skład budowy geologicznej podłoża badanego pionu, jednak jego powierzchnia, wynosząca znacznie ponad 5 m² a także fakt zalegania powyżej muru (w tym bezpośrednio nad górną krawędzią) gruntów bez wątplenia rodzimych (należących wprawdzie do grupy gruntów przemieszczonych), czyni go elementem najważniejszym dla wyjaśnienia przyczyn katastrofy budowlanej. Budowla, której element stanowi odkryty w otworach nr 11, 14 i 15 mur, musiała zostać wykonana techniką „górnictw”, tj. oszalowanego podkopu, gdzie szalunek sukcesywnie zastępowano ścianami i sklepieniem podziemnego korytarza lub komory.

2.1 Warunki hydrogeologiczne w podłożu badanego pionu

W podłożu badanego pionu skrzydła północnego Zamku woda gruntowa występuje w dwóch odrębnych strefach. Woda strefy dolnej przesycą głębsze partie wodnolodowcowych piasków, budujących najgłębsze partie objętej badaniami strefy, jej swobodne zwierciadło stabilizuje się w otworze nr 6 na głębokości 21,0 m p.p.t.; tj. na rzędnej 3,16 m n.p.m. W archiwalnych profilach nr B4+B3/GCO i B2+B5/GCO woda ta występowała na głębokości 21,0 – 22,7 m p.p.t.; tj. 1,60 – 2,25 m n.p.m. Woda strefy dolnej odpływa do doliny dolnej Odry, zasilając wodę gruntową w podłożu jej dna a w konsekwencji także wody rzeki. Wahania poziomu wody gruntowej tej strefy są niewielkie. Woda ta nie ma żadnego związku z zapadliskiem i grawitacyjnym przemieszczeniem wyżejległych gruntów genezy zwałowej.

Zwierciadło wody gruntowej górnej strefy występuje jedynie w dwóch otworach wykonanych w obrębie zapadliska – w otworze nr 1 na głębokości 9,7 m poniżej posadzki piwnicy (tj. na rzędnej 11,0 m n.p.m.) oraz w otworze nr 10 na głębokości 4,0 m poniżej dna wykonanego w zapadlisku wykopu - na rzędnej 10,18 m n.p.m. Sączenia wody stwierdzono w otworze nr 7 na głębokości 8,8 i 9,7 m poniżej posadzki (12,29 i 11,39 m n.p.m.) oraz w otworze nr 10 powyżej zwierciadła wody, na głębokości 3,1 m poniżej dna wykopu i rzędnej 11,08 m n.p.m.

W oddalonych od siebie zaledwie o 1,1 m otworach nr 1 i 10 różnica poziomu wody w śródglinowej warstwie piasków wynosi aż 0,82 m. Na przekrojach geotechnicznych I i VIII występujące w tych

otworach piaski drobne i średnie wyinterpretowano więc jako dwie nieciągłe warstwy, rozdzielone warstwą słabo przepuszczalnych glin.

W otworach archiwalnych na podłożu dziedzińca Zamku woda gruntowa o zwierciadle napiętym nawiercona została na głębokości 10,7 – 17,2 m p.p.t. a stabilizowała się na głębokości 8,0 – 9,0 m p.p.t.; tj. na rzędnych 15,30 – 16,30 m n.p.m. W jednym z otworów zaobserwowano jedynie sączenie na głębokości 9,7 m p.p.t (na rzędnej 14,60 m n.p.m.).

Zwałowe grunty niespoiste są gruntami wodoprzepuszczalnymi, o przeciętnych wartościach współczynnika filtracji od $k = 0,2$ m/d dla piasków ilastych (clSa) do 12,0 m/d dla piasków średnich (MSa). Grunty spoiste są słabo przepuszczalne, o współczynniku filtracji ok. $k = 0,1$ m/d dla piasków gliniastych (clsiSa) i pyłów (Si) oraz $k < 0,01$ m/d dla glin piaszczystych (saCl) i glin pylastych (sacSi).

Należy podkreślić, że powyżej nawodnionych wodnolodowcowych piasków budujących najgłębsze partie objętego badaniami podłoża (strefa dolna wody gruntowej) w obrębie utworów zwałowych, zarówno zalegających *in situ*, jak i przemieszczonych grawitacyjnie, woda strefy górnej występuje w postaci izolowanych przejawów zwierciadła lub sąceń, co jest efektem nieciągłości i stosunkowo niewielkiej ilości warstw gruntów niespoistych. Warstwy te stanowią jednak praktycznie jedyną drogę migracji wody w obrębie górnej strefy.

Wobec usytuowania Zamku przy krawędzi wysoczyzny morenowej oraz bezsprzecznej nieciągłości warstw zwałowych piasków, w podłożu badanego terenu nie zachodzi istotny wpływ wody gruntowej w kierunku doliny dolnej Odry i uchodzącej do niej doliny erozyjnej u podnóża skarpy tarasu północnego. Zasilanie wody gruntowej przez bezpośrednią infiltrację wód opadowych zachodzić może na niewielką skalę. Woda infiltracyjna w przewodzie gromadzi się w nasypach ponad stropem piasków gliniastych i glin (wodę tę uchwyciono w piezometrze nr 2, założonym przez firmę A11R na dziedzińcu Zamku). Dziedziniec pokryty jest przepuszczalną nawierzchnią z kostki brukowej o szerokich fugach, co sprzyja infiltracji, jednak powierzchnia, na której w podłoże przesiąkać może woda migrująca następnie ku północy, przez podłoże badanego pionu skrzydła północnego, jest niewielka, ponieważ niemal cały dziedziniec nachylony jest na południowy zachód, ku bramie przy Wieży Zegarowej. Obszar, z którego infiltrująca woda spływać może na północ, ograniczony jest od południa podziemnym zbiornikiem wód deszczowych dla celów pożarowych, zagłębionym do rzędnej 19,93 m n.p.m. Szerokość tego obszaru wynosi więc zaledwie ok. 4 m. Ponieważ jednak podczas próby szczelności zbiornika stwierdzono wyciek z połączenia z rurą zasilającą zbiornik, ilość przesiąkającej pod skrzydło północne wody może być okresowo zwiększona o objętość tego wycieku.

Filtracja wody z północnego skraju dziedzińca (oraz z rury zasilającej zbiornik) zachodzi w podłożu badanego pionu na niewielką skalę i w bardzo powolnym tempie. Świadczy o tym brak naporowego zwierciadła wody w warstwach piasków oraz występowanie wody o zwierciadle swobodnym jedynie w najgłębszych spośród tych warstw. Ponieważ jednak większość utworów zwałowych budują mało spoiste piaski gliniaste, przesiąkanie wody choćby przez występujące w nich niekiedy warstewki piasku o grubości pojedynczych milimetrów (tzw. laminy) tworzyć może mikrostrefy uplastycznienia a przez to ułatwione go ścięcia i poślizgu, co wydatnie wspomaga

grawitacyjne przemieszczenia. Trwająca stulecia filtracja niewielkich ilości wody ku murowanej budowli podziemnej mogła także przyczynić się do jej destrukcji.

2.2 Właściwości geotechniczne gruntów w podłożu badanego pionu

W obrębie utworów zwałowych, osobno w grupie gruntów przemieszczonych i gruntów zalegających *in situ*, wydzielono łącznie 10 warstw geotechnicznych. Poza podziałem geotechnicznym pozostawiono nasypy niekontrolowane, oraz zalegające w najgłębszych partiach podłoża wodnolodowcowe piaski. Dla gruntów spoistych w grupie gruntów przemieszczonych przyjęto niższy stopień konsolidacji wg PN-81/B-03020 (C) od typowego dla utworów zwałowych (B), ponieważ powolne zapadanie kolejnych partii piasków gliniastych i glin, połączone z filtracją niewielkich ilości wody, z pewnością pogorszyło ich właściwości mechaniczne w porównaniu z gruntami w otoczeniu zapadliska.

WARSTWA I to zwałowe przemieszczone piaski drobne (FSa wg PN-EN 1997-2), piaski drobne ze żwirem (grFSa) i na pograniczu piasku średniego (FSa/MSa), wilgotne i nawodnione, bardzo luźne o wyprowadzonej wartości stopnia zagęszczenia $I_D = 15\%$. Są to grunty o znacznie obniżonej nośności, budują lokalne strefy rozluźnienia o miąższości 0,5 i 0,9 m w otworach nr 1 i 4; głębokość do ich stropu wynosi odpowiednio 10,0 i 8,2 m poniżej posadzki piwnicy.

WARSTWA II to zwałowe przemieszczone piaski drobne z warstewkami piasku gliniastego (FSa/clsiSa), wilgotne, luźne o wyprowadzonej wartości stopnia zagęszczenia $I_D = 25\%$. Są to grunty o obniżonej nośności, lokalnie w profilu otworu nr 14 budują strefę rozluźnienia o miąższości 1,2 m (5,8 – 7,0 m poniżej posadzki).

WARSTWA III to zwałowe przemieszczone piaski drobne (FSa) i piaski średnie (MSa wg PN-EN 1997-2), wilgotne i nawodnione, średniozagęszczone o wyprowadzonej wartości stopnia zagęszczenia $I_D = 37\%$. Są to grunty nośne, występują w otworach nr 1, 6 – 11 i 14, budując najczęściej dwie warstwy gruntów niespoistych o miąższości 0,2 – 2,3 m (najwięcej w otworze nr 14); w otworze nr 1 zalegają powyżej bardzo luźnych piasków w-wy I (9,0 – 10,0 m poniżej posadzki). Analogiczny stopień zagęszczenia przyjęto także dla zalegających *in situ* piasków zwałowych i wodnolodowcowych w otworach nr 6 i 8 na tarasie północnym, grunty te są jednak z pewnością bardziej zagęszczone.

WARSTWA IV to zwałowe przemieszczone gliny piaszczyste (saCl wg PN-EN 1997-2) i piaski gliniaste (clsiSa wg PN-EN 1997-2), wilgotne, w stanie plastycznym o charakterystycznej wartości wskaźnika konsystencji $I_C = 0,60$. Są to grunty o obniżonej nośności, występują w 8 otworach w obrębie zapadliska (nr 1, 4, 10 – 12 i 14), budując najsilniej uplastycznione partie gruntów spoistych o miąższości 0,4 – 2,4 m (najwięcej w otworze nr 11); lokalnie w profilu otworu nr 10 zalegają aż w czterech strefach o miąższości kolejno 1,7; 0,4; 0,7 i 0,4 m, na głębokości od 2,0 do 6,1 m poniżej dna wykopu.

WARSTWA V to zwałowe przemieszczone gliny piaszczyste (saCl), wilgotne, w stanie twardoplastycznym o charakterystycznej wartości wskaźnika konsystencji $I_C = 0,77$. Są to grunty nośne, natrafiono na nie w czterech otworach w obrębie zapadliska (nr 1, 10, 11 i 14), gdzie budują niewielkie partie gruntów spoistych o miąższości 0,3 – 3,0 m (najwięcej w otworze nr 14, gdzie grunty te zalegają bezpośrednio nad ceglany murem); w otworach nr 10 i 11 zalegają w dwóch strefach o miąższości 0,3 – 1,1 m.

WARSTWA VI to zwałowe przemieszczone piaski gliniaste (clsiSa), wilgotne, w stanie twardoplastycznym o charakterystycznej wartości wskaźnika konsystencji $I_C = 0,77$. Są to grunty nośne, występują w dziewięciu otworach w obrębie zapadliska (nr 1, 3, 4, 7, 10 – 13 i 15), budując przeważającą część przemieszczonych gruntów spoistych, zwłaszcza ich najpłytsze partie. Miąższość poszczególnych stref zalegania piasków gliniastych w-wy VI waha się od 0,3 do 7,6 m (najwięcej w otworze nr 12); aż w czterech otworach (nr 4, 7, 10 i 11) stwierdzono po dwie takie strefy.

WARSTWA VII to zwałowe gliny piaszczyste (saCl) zalegające *in situ*, wilgotne, w stanie twardoplastycznym o charakterystycznej wartości wskaźnika konsystencji $I_C = 0,85$. Są to grunty nośne, natrafiono na nie jedynie w czterech otworach, w tym dwóch poza zapadliskiem (nr 6 i 16), oraz dwóch w obrębie zapadliska (nr 10 i 12), gdzie budują najgłębsze partie objętej badaniami strefy, podścielając grunty przemieszczone. Miąższość glin w-wy VII w głębokim otworze nr 6 na tarasie północnym wynosi aż 9,2 m; w pozostałych otworach, które zakończono w tych gruntach, przekracza 2,0 – 5,5 m.

WARSTWA VIII to zwałowe piaski gliniaste (clsiSa) zalegające *in situ*, wilgotne, w stanie twardoplastycznym o charakterystycznej wartości wskaźnika konsystencji $I_C = 0,90$. Są to grunty nośne, występują jedynie w dwóch otworach (nr 8 na tarasie północnym i nr 14 w obrębie zapadliska, a ich miąższość wynosi zaledwie 0,5 – 0,8 m.

WARSTWA IX to zwałowe piaski gliniaste (clsiSa) zalegające *in situ*, mało wilgotne, w stanie półzwałowym o charakterystycznej wartości wskaźnika konsystencji $I_C = 1,00$. Są to grunty nośne, występują w trzech otworach poza zapadliskiem (nr 6, 8 i 16), osiągając w nich miąższość 3,8 – 4,5 m; ponadto w otworze nr 4 w zapadlisku podścielają grunty przemieszczone, zalegając poniżej 12,3 m od posadzki piwnicy (ich miąższość przekracza tam 0,7 m).

WARSTWA X to zwałowe gliny pylaste (sacLSi wg PN-EN 1997-2) zalegające *in situ*, wilgotne, w stanie twardoplastycznym o charakterystycznej wartości wskaźnika konsystencji $I_C = 0,85$. Są to grunty nośne, natrafiono na nie jedynie w otworze nr 14 na głębokości 14,0 m poniżej posadzki piwnicy, gdzie podścielają one grunty przemieszczone i rozmyte wskutek przewierci przez mur. Glin warstwy X nie przewiercono do głębokości 14,25 m.

Rozprzestrzenienie i sposób zalegania warstw ilustrują załączone przekroje geotechniczne I – VIII, opracowane bez przewyższenia w skali 1:100/100 (załączniki 1.3 – 1.7).

Wartości wyprowadzone stopnia zagęszczenia piasków obliczono z wyników sondowań DPL, stosując podaną w PN-EN 1997-2, załącznik G, pkt G.1 interpretację dla gruntu źle uziarnionego powyżej i poniżej zwierciadła wody gruntowej.

Wartości charakterystyczne stopnia plastyczności gruntów spoistych wyprowadzono z wyników badań laboratoryjnych, oraz analizy makroskopowej.

Wartości pozostałych zestawionych w poniższej tabeli parametrów geotechnicznych gruntów wyprowadzono na podstawie doświadczenia porównywalnego w rozumieniu PN-EN 1997-2 (metoda B w korelacji z wartością I_D i I_L wg PN-81/B-03020, przy

uwzględnieniu symbolu konsolidacji „C” dla gruntów warstw IV – VI i „B” dla warstw VII - X).

Nazwa parametru	W-wa I	W-wa II	W-wa III
Rodzaj gruntu	FSa	FSa	FSa,MSa,CSa
Stopień zagęszczenia I_p	15%	25%	37%
Wilgotność naturalna W_n (%) dla gruntu: wilgotnego nawodnionego	19 -	19 -	16 24
Gęstość objętościowa $\rho(t \cdot m^{-3})$ dla gruntu: - wilgotnego - nawodnionego	1.70 -	1.70 -	1.75 1.90
Kąt tarcia wewnętrznego φ (°)	28.69	29.18	29.77
Edometryczny moduł ściśliwości pierwotnej M_0 (kPa)	32548	38674	48415
Moduł pierwotnego odkształcenia gruntu E_0 (kPa)	23906	28714	36133
Współczynnik nośności N_D	15.90	16.79	17.95
Współczynnik nośności N_B	6.12	6.62	7.28

W tabeli podano wartości wyprowadzone

Nazwa parametru	W-wa IV	W-wa V	W-wa VI
Rodzaj gruntu	saCl, clsiSa	saCl	clsiSa
Wskaźnik konsystencji I_C	0.60	0.77	0.77
Wilgotność naturalna w_n (%)	17	12	13
Gęstość objętościowa $\rho(t \cdot m^{-3})$	2.10	2.20	2.15
Kąt tarcia wewnętrznego φ (°)	11.60	14.32	14.32
Spójność c_u (kPa)	10.65	15.74	15.74
Edometryczny moduł ściśliwości pierwotnej M_0 (kPa)	19203	27497	27497
Moduł pierwotnego odkształcenia gruntu E_0 (kPa)	13442	19248	19248
Współczynnik nośności N_D	2.83	3.70	3.70
Współczynnik nośności N_B	0.28	0.52	0.52
Współczynnik nośności N_C	8.93	10.57	10.57

W tabeli podano wartości charakterystyczne

Nazwa parametru	W-wa VII	W-wa VIII	W-wa IX	W-wa X
Rodzaj gruntu	saCl	clsiSa	clsiSa	saclSi
Wskaźnik konsystencji I_C	0.85	0.90	1.00	0.85
Wilgotność naturalna w_n (%)	12	13	10	20
Gęstość objętościowa ρ (t m ⁻³)	2.20	2.15	2.15	2.10
Kąt tarcia wewnętrznego ϕ (°)	19.20	20.13	21.81	19.20
Spójność c_u (kPa)	33.45	35.48	39.51	33.45
Edometryczny moduł ścisłości pierwotnej M_0 (kPa)	41944	48089	63548	41944
Moduł pierwotnego odkształcenia gruntu E_0 (kPa)	31878	36547	48297	31878
Współczynnik nośności N_D	5.92	6.49	7.68	5.92
Współczynnik nośności N_B	1.29	1.51	2.01	1.29
Współczynnik nośności N_C	14.11	14.96	16.68	14.11

W tabeli podano wartości charakterystyczne