



TOMASZ GODLEWSKI, *t.godlewski@itb.pl*
STANISŁAW ŁUKASIK, *s.lukasik@itb.pl*
ŁUKASZ KACZYŃSKI, *l.kaczynski@itb.pl*
KONRAD CHADA, *k.chada@itb.pl*
WITOLD BOGUSZ, *w.bogusz@itb.pl*
Instytut Techniki Budowlanej

GEOTECHNICZNE UWARUNKOWANIA AWARII KONSTRUKCJI NABRZEŻA RZECZNEGO

GEOTECHNICAL CONDITIONS OF RIVER EMBANKMENT CONSTRUCTION FAILURE

Streszczenie Artykuł dotyczy awarii powstałej na skutek procesów geodynamicznych i deformacji filtracyjnych zachodzących w nabrzeżu rzeki nizinnej. Przedstawiono w nim przyczyny powstania uszkodzeń fragmentu konstrukcji prawego nabrzeża Wisły w Toruniu, polegającego na wychyleniu brusów oraz zdeformowaniu powierzchni skarp i tarasów stanowiących jej zabezpieczenie. Przyczyną powstania zsuwu gruntu był długotrwanie utrzymujący się niski stan rzeki oraz zły stan nasypów stanowiących bezpośrednio podłoże konstrukcji. W konsekwencji procesów sufozyjnych doszło do lokalnego rozluźnienia podłoża i miejscowej utraty stateczności skarpy.

Abstract This paper issue is lowland river waterfront failure due to geodynamic reasons. The paper presents causes for part of right Wisła riverside damage in Toruń. Long term low water state and bad banks condition were reasons for landslide, sheet piling rotation and escarpment and terraces deformations. Loosening of the soil and local loss of stability were consequences of suffosion.

1. Wprowadzenie

Nabrzeża rzeczne są obszarami występowania wielu niekorzystnych procesów geologicznych. W korytach rzecznych występuje intensywna erozja wgłębna i boczna, a w sąsiedztwie często występują procesy związane z deformacjami filtracyjnymi zwłaszcza sufozją i erozją wewnętrzną.

Erozja boczna jest jedną z przyczyn powodujących konieczność regulacji koryt rzecznych. Wśród technicznych umocnień brzegów wykonywanych przy obiektach wodnych i nabrzeżach użytkowych wyróżnić można umocnienia skarp przy użyciu bruku, materaców, narzutu lub płyt, zarówno betonowych jak kamiennych, kaszyc, gabionów, palościanek oraz szczelnych ścian betonowych np. w technologii prefabrykowanych żelbetowych brusów.

Deformacje filtracyjne są związane z wysokimi wartościami ciśnienia sphywowego występującego w podłożu tarasów zalewowych i nadzalewowych, zwłaszcza w ekstremalnych (powodziowych) stanach wód w rzekach. Zasady projektowania zabezpieczeń przed niepożądanymi zjawiskami przedstawia wiele publikacji w tym norma PN-EN 1997-1:2008 Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne [1]. Wśród wymienianych sposobów zabezpieczenia znajduje się stosowanie odpowiednio dobranych warstw gruntów niespoistych ograniczających wynoszenie

drobnych cząstek gruntu (filtry odwrotne) lub stosowanie tworzyw sztucznych oraz geotekstyliów.

Błędy w wykonawstwie oraz brak należytej konserwacji często prowadzą do degradacji zabezpieczeń i w konsekwencji do awarii.

2. Opis konstrukcji i uszkodzeń

Opisywany fragment nabrzeża jest częścią popularnej w Toruniu nadwiślańskiej promenady spacerowej, Bulwaru Filadelfijskiego. Konstrukcja nabrzeża powstała w latach 70 ubiegłego wieku, a w latach 2008÷2009 przeszła rewitalizację obejmującą doraźną naprawę uszkodzeń w postaci lokalnych zapadlisk kostki oraz zerodowanego oczepu. W morfologii nabrzeża ważną rolę pełnią trzy poziomy tarasów (pótek) znajdujące się na rzędnych 35,70; 37,75 i 39,40 m n.p.m., które łagodzą nachylenie skarpy. Od strony rzeki konstrukcja ograniczona jest na całej długości rzędem betonowych brusów o długości od 5 do 8 m i przekrojach prostokątnych o wymiarach od 18×60 cm do 32×50 cm. Brusy spięte są oczepem betonowym o wymiarach 60×60 cm, zdylatowanym co 20 m. Powierzchnie skarp pokryte są betonowymi dyblami DC-15 o wymiarach 30/18×49×15 cm, umieszczonymi na warstwie geowłókniny i 5 cm podsypce z pospółki. Niższa skarpa ma szerokość 3,65 m, a wyższa 2,90 m. Nachylenie powierzchni skarp wynosi wg projektu 1:1,5. Tarasy wykonane są z łupanej kostki granitowej o wymiarach 15×15×18 cm, ograniczonej betonowymi prefabrykowanymi krawężnikami, ułożonej na 10 cm warstwie mieszanki betonowej kl. C 5/10, W-6, XF. Najniższa ławeczka ma szerokość 0,65 m, wyższa 1,36 m, a najwyższa 1,1 m i połączona jest z asfaltową alejką spacerową o szerokości ok. 5,3 m [5]. Powyżej alejki znajduje się zbocze skarpy ziemnej nieutwardzonej, na szczycie której biegnie jezdnia ul. Bulwar Filadelfijski.

W swojej historii konstrukcja wielokrotnie w czasie wyższych stanów Wisły była częściowo lub całkowicie zalewana. Ostatnio w maju 2010 bulwar został przykryty falą powodziową o wysokości ponad 8 m do rzędnej ok. 40,0 m n.p.m. – rys. 1.



Rys. 1. Widok rzeki w trakcie powodzi (fot. w_orzechowski Google earth) – z lewej, oraz stan Wisły w chwili awarii – z prawej [6]

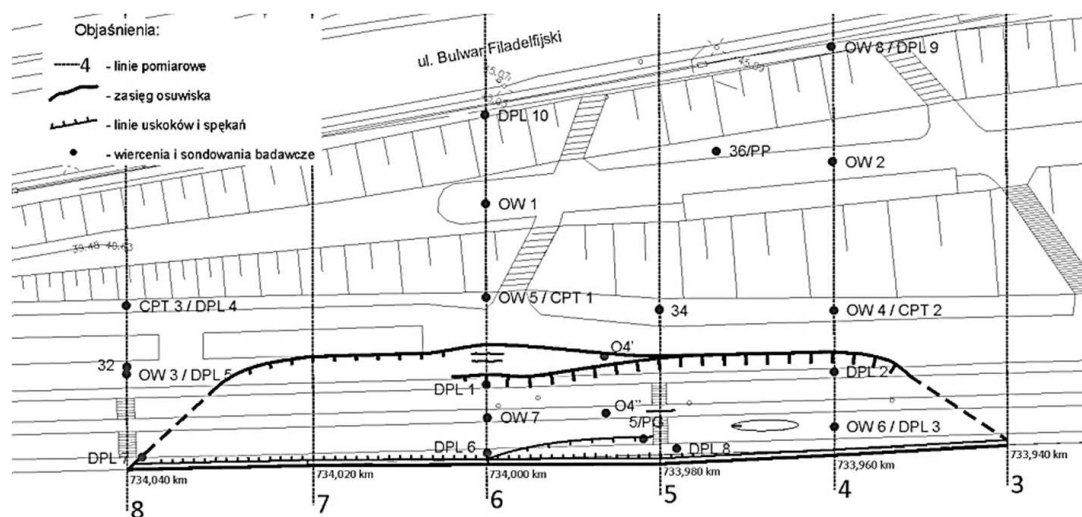
We wrześniu 2012 stwierdzono uszkodzenie nabrzeża. W październiku 2012 roku przeprowadzono inwentaryzację uszkodzeń oraz badania podłoża obiektu. Założono 9 przekrojów pomiarowych, w których dokonano pomiarów geometrii skarpy, tarasów nabrzeża oraz dna Wisły, zarówno w miejscu naruszenia konstrukcji jak i w jej sąsiedztwie. W trzech charakterystycznych liniach pomiarowych wykonano badania geotechniczne podłoża konstrukcji.

Na podstawie przeprowadzonych oględzin stwierdzono występowanie uszkodzeń północnego nabrzeża na długości ok. 90 m (rys. 2). Na poziomie trzeciego tarasu (licząc od strony rzeki)

stwierdzono występowanie dwóch połączonych ze sobą nisz zapadliskowych (rys. 3). W najszerszym miejscu nisza wcina się w powierzchnię najwyższego tarasu na szerokość ok. 2,1 m. Wysokość powstałego uskoku w najwyższym punkcie wynosi ok. 59 cm. Ponadto stwierdzono liczne spękania warstwy ścieralnej konstrukcji deptaka. Na poziomie drugiego tarasu stwierdzono uszkodzenia monolitycznych schodów betonowych, które zostały wychylone o ok. 10° w kierunku nabrzeża. Spocznik schodów uległ pęknięciu w miejscu styku elementów prefabrykowanych schodów powyżej. Na skarpie pomiędzy pierwszym i drugim tarasem, występuje zapadlisko w obrębie betonowych dybli o głębokości ok. 50 cm. Na najniższym tarasie stwierdzono zapadlisko kostki granitowej na długości 40 m o głębokości ok. 20 cm.

Na betonowym oczepie brusów na obszarze obrywu wystąpiły pęknięcia. Ponadto został on przesunięty w kierunku rzeki, maksymalnie o $\sim 1,04$ m (rys. 3).

Pomiędzy betonowymi brusami widoczne są liczne szczeliny, z których miejscami sączy się woda. Sama konstrukcja brusów w wielu miejscach jest zerodowana, widoczne jest skorodowane zbrojenie oraz liczne miejsca "łatania" szczelin pomiędzy rozsuniętymi brusami za pomocą stalowych płaskowników.



Rys. 2. Inwentaryzacja uszkodzeń konstrukcji [6]



Rys. 3. Widoczne przemieszczenie oczepu (z lewej) oraz nisza zsuwu (z prawej) [6]

2. Warunki gruntowo- wodne

W rejonie analizowanego obszaru Wisła tworzy szeroką dolinę wcinając się w mio-plioceńskie iły poznańskie. W obrębie doliny bezpośrednio na utworach trzeciorzędowych leżą holocenne piaski rzeczne tworzące taras akumulacyjny. Poza doliną na utworach plioceńskich spoczywają naprzemianległe warstwy glin i piasków późniejszych zlodowaceń.

W podłożu do gł. od 2÷7 m ppt, stwierdzono występowanie nasypów niekontrolowanych (niebudowlanych) złożonych z humusu, gruzu ceglanego i betonowego z domieszką piasku średniego i żwiru oraz często zaglinionego. Poniżej występuje warstwa rzecznych piasków: średniego, grubego i żwiru oraz lokalnie piasku humusowego, przykrywająca ciągłą warstwę iłów trzeciorzędowych. Są one wykształcone w postaci glin pylastych, glin pylastych zwięzłych, iłów oraz iłów pylastych i pyłów.

W podłożu wyróżniono następujące warstwy geotechniczne:

- warstwa I – młodsze nasypy zbudowane z mieszaniny gruntów rodzimych zalegających w podłożu i gruzu ceglanego oraz betonowego z domieszkami humusu, gliny, piasku średniego i grubego;
- warstwa II – starsze nasypy zbudowane z mieszaniny gruntów rodzimych zalegających w podłożu i gruzu ceglanego oraz betonowego z domieszkami humusu, gliny, piasku średniego i grubego. Stanowią one podłoże dla nasypów młodszych, oraz budują skarpe powyżej nabrzeża;
- warstwa III – to piaski średnie do grubych, lokalnie drobne, z możliwymi drobnymi wkładkami gliniastymi i pylastymi;
- warstwa IV – to grunty spoiste formacji iłów trzeciorzędowych, wykształcone w postaci glin pylastych, glin pylastych zwięzłych, iłów i iłów pylastych. Warstwa ta nie została przewiercona do głębokości 11 m.

Warunki w rejonie nabrzeża przedstawia przekrój geotechniczny przedstawia rys. 4. Przyjęte do analizy charakterystyczne wartości parametrów gruntów przedstawiono w tabelicy 1.

Tabela 1. Wartości charakterystyczne parametrów geotechnicznych [6]

Warstwa geotechniczna	Rodzaj gruntu	Stan gruntu	Wartości średnie I_L/I_D [-]	Gęstość obj. gruntu ρ [T/m ³]	Efektywny kąt tarcia wew. ϕ' [°]	Efektywna spójność c' [kPa]	Moduł odkształcenia E [MPa]	Wsp. filtracji k [m/s] 1)
Ia	H, Ps, Pr, Ps, gruz	szg	0,64	1,70	28	5	20	1,8×10 ⁻⁴
Ib	H, Ps, Pr, gruz	ln	0,43	1,70	24	5	15	1,8×10 ⁻⁴
IIa	H, zagl Ps, Pr, gruz	szg	0,59	1,80	32	5	30	2,5×10 ⁻⁵
IIb	H, zagl Ps, Pr, gruz	szg	0,51	1,80	29	5	30	2,5×10 ⁻⁵
IIIa	Ps, Pr	zg	0,67	1,90	33	1	60	1,0×10 ⁻³
IIIb	Ps, Pr	szg	0,44	1,85	31	1	50	1,0×10 ⁻³
IIIc	Pd+H / Ps, Pr	szg	0,41	1,70	31	1	50	1,0×10 ⁻³
IV	I, Ip, Gpz, Gp	tpl	0,05	2,05	19	20	30	1,0×10 ⁻⁹
Narzut kamienny	—	—	—	2,10	40	1	90	1,0×10 ⁻²
Zasyp	—	—	—	1,80	25	1	50	1,0×10 ⁻³

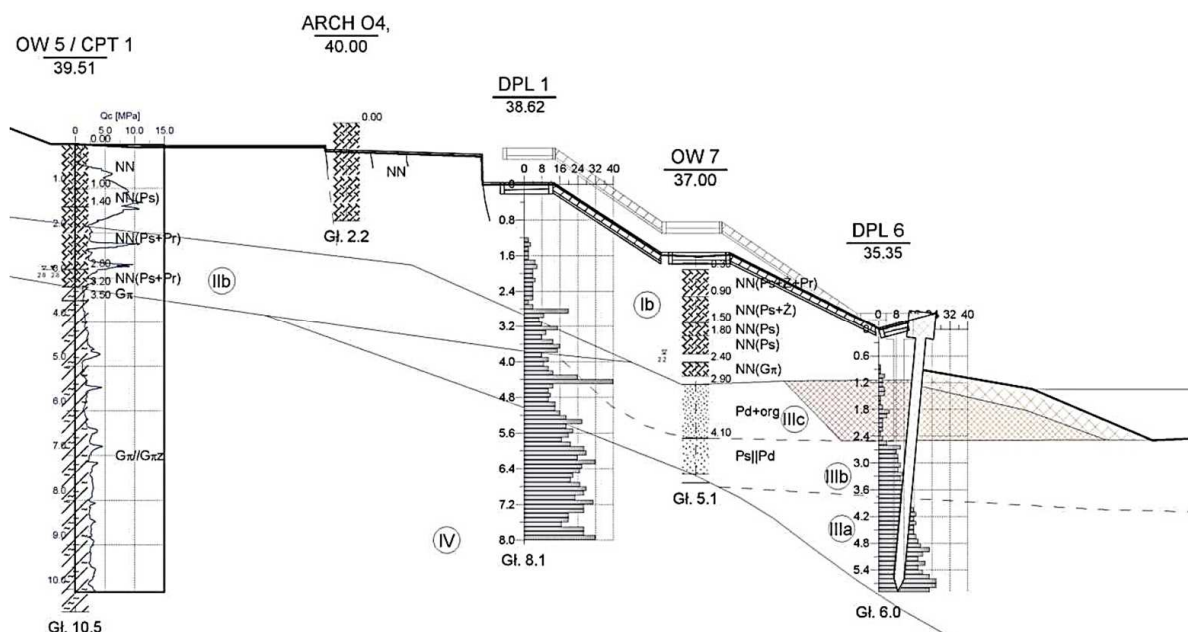
1) – na podstawie krzywych uziarnienia wg wzoru Seelheima

W rejonie analizowanego obszaru do gł. ok. 11 m stwierdzono występowanie jednego poziomu zwierciadła wód gruntowych o charakterze swobodnym. Rzędna zwierciadła wód

gruntowych zależy od głębokości występowania stropu gruntów nieprzepuszczalnych, odległości od rzeki oraz poziomu wody w jej korycie. W czasie badań rzędna zwg występowała w przedziale 40,41 ÷ 34,61 m n.p.m. Charakterystyczne stany wody w rzece wynoszą:

- średnia niska woda SNW 33,79 m n Kr (181 cm),
- średnia woda SW 35,24 m n Kr (326 cm),
- średnia wielka woda SWW 38,87 m n Kr (689 cm)

W trakcie badań poziom wody w rzece kształtował się na rzędnej 34,04 m n.p.m. Niski poziom Wisły utrzymywał się od wielu miesięcy (co najmniej od maja br.).



Rys. 4. Przekrój geotechniczny na linii 6, w tle schemat konstrukcji przed i po awarii [6]

4. Analiza stateczności

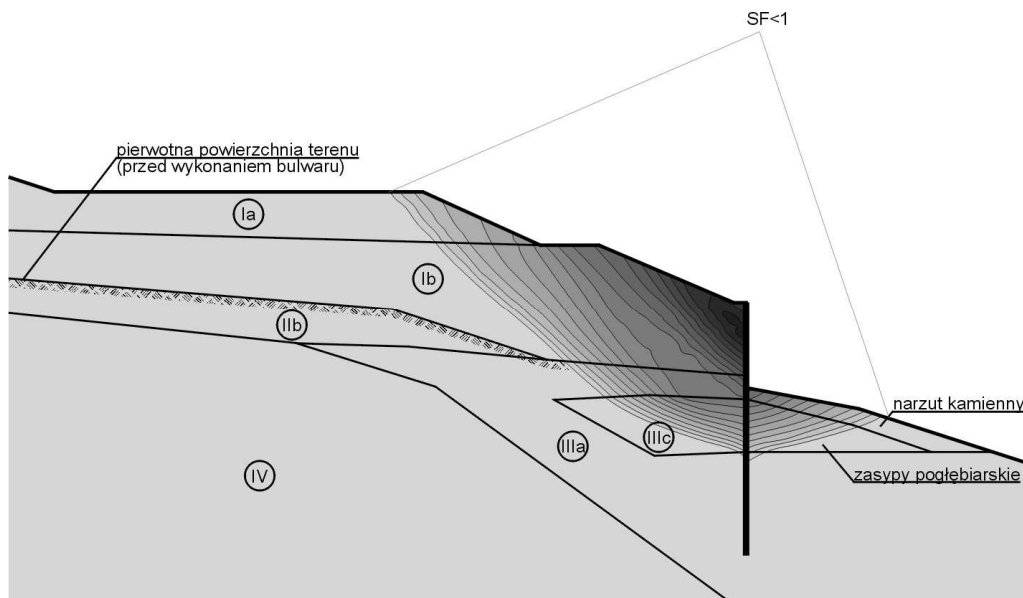
Obliczenia wykonano w programie ZSoil v12. Do obliczeń globalnego współczynnika stanu równowagi (Safety Factor) wykorzystano metodę elementów skończonych (MES), która jest coraz częściej wykorzystywana do rozwiązywania skomplikowanych problemów statyki i dynamiki budowli inżynierskich. Służy ona również z powodzeniem do rozwiązywania problemów stateczności.

Obliczenia stateczności wykonano w trzech przekrojach. Stateczność przeanalizowano dla przypadku występowania poziomu wody średniej oraz stanu wody w okresie awarii z symulacją degradacji parametrów geotechnicznych warstwy IIIc, będąca warstwą występowania procesów sufozycznych bezpośrednio za konstrukcją oporową nabrzeża. Redukcja parametrów w kolejnych krokach obliczeniowych miała na celu sprawdzenie możliwości wystąpienia procesu utraty stateczności na skutek poślizgu (zsuwu) w warstwach nasypowych. Przeprowadzona analiza wykazała, że przewidywany zasięg przemieszczeń masywu gruntowego odpowiada zaobserwowanemu na skutek awarii. W odniesieniu do całości nabrzeża, ma ona jednak charakter lokalny. Nie stwierdzono zagrożenia utraty globalnej stateczności, sięgającej do ul. Bulwar Filadelfijski.

Utrata stateczności w tych przekrojach następuje, gdy parametry warstwy IIIc zostają zredukowane do wartości $\varphi = 10^\circ$ oraz $E = 10$ MPa. Tak niskie wartości w obrębie całej warstwy wskazują nie tylko na rozluźnienie gruntu na skutek zjawiska sufozji. Bezpośrednie

obserwacje wskazują na występowanie kawern i pustek w jej obrębie. Mogły one zostać wywołane zbyt dużym gradientem i prędkością filtracji wody, zwłaszcza w okresach szybkiego opadania wód powodziowych.

Przemieszczenia gruntu w momencie utraty stateczności przedstawia rys. 5.



Rys. 5. Obliczenia stateczności – stan w chwili awarii

5. Przyczyny awarii

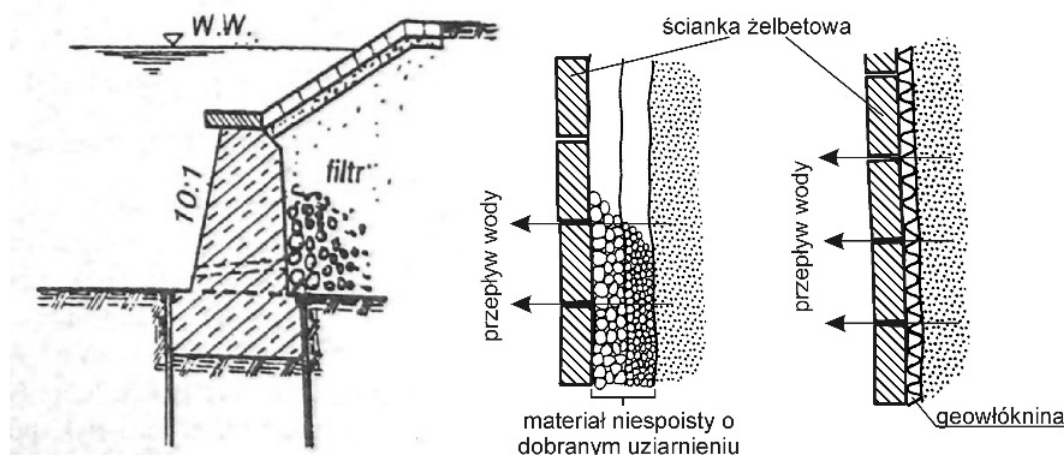
Analiza zebranych informacji pozwoliła na wskazanie przyczyn zaistniałych uszkodzeń.

Pierwszym z czynników było długotrwałe obniżenie się poziomu wody w rzece. Zmniejszenie słupa wody spowodowało redukcję siły dociskającej żelbetową ściankę z brusów do powierzchni skarpy. Niski poziom wody spowodował również zdrenowanie wody z nasypu i zwiększenie tym samym jego ciężaru efektywnego, co negatywnie wpłynęło na lokalną stateczność skarpy.

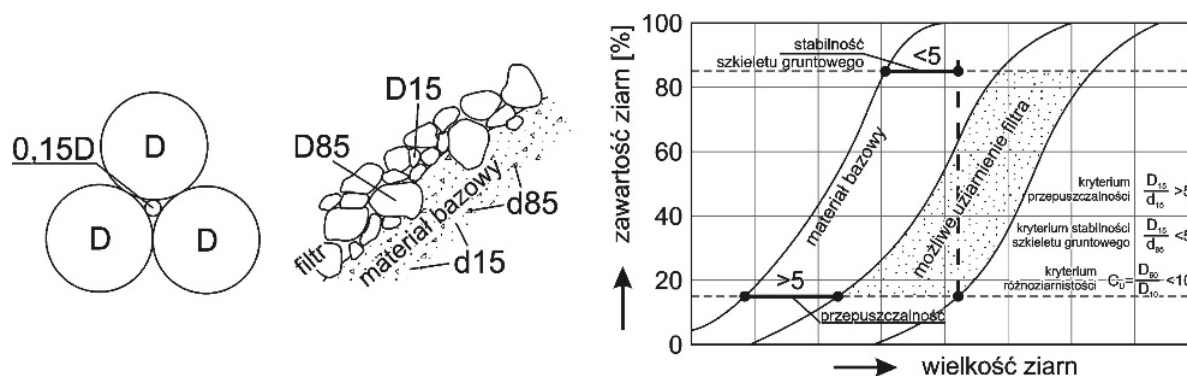
Drugim czynnikiem jest uszkodzenie filtra odwrotnego spowodowane rozszczerleniem brusów. Przy powstaniu szczelin o znacznej szerokości (>30 mm) materiał lokalny zastosowany do budowy filtra uległ częściowemu wypłukaniu, powodując dalszą degradację nasypu. Zastosowanie filtra zbudowanego ze starannie dobranych gruntów oraz dodatkowo wbudowanie materiałów syntetycznych (geowłóknina), mogłoby skutecznie zabezpieczyć grunt za konstrukcją przed sufozją [7]. Przykładowe schematy budowy filtra odwrotnego przedstawia rys. 6, a zasady dobierania materiału dla warstw filtra odwrotnego przedstawia rys. 7.

Materiał do wykonania filtra odwrotnego powinien odpowiadać polu na krzywej uziarnienia wyznaczonemu na podstawie kryterium stabilności szkieletu gruntowego oraz kryterium przepuszczalności (rys. 7), poza tym materiał ten powinien charakteryzować się wskaźnikiem różnoziarnistości (CU) poniżej 10 [5].

Sufozja wywołana długotrwałym wezbraniem powodziowym w 2010 r. doprowadziła do powstania pustek i rozluźnień w nasypie, co pogorszyło jego parametry. Efekt ten jest również obserwowany obecnie poza analizowanym obszarem awarii nabrzeża. Ma to też potwierdzenie w szacunkowym obliczeniu objętości mas ziemnych w badanych przekrojach na obszarze zapadliska, które wykazały deficyt rzędu 3 m³ na 1 m szerokości przekroju modelowego.



Rys. 6. Zastosowanie oraz schemat budowy filtra odwrotnego wg [2] i [3]



Rys. 7. Zasady doboru materiału na filtr odwrotny [4]

Zmniejszenie docisku od strony wody i zdrenowanie podłoża na skutek niskiego stanu wody w rzece w połączeniu z występującymi rozluźnieniami i pustkami o genezie sufozyjnej spowodowało zsuniecie warstw nasypowych młodszych (warstwa I) po pierwotnej (starej) powierzchni skarpy zbudowanych z nasypów starszych (warstwa II).

Podsumowując należy stwierdzić, że obserwowana forma zniszczenia w kontekście przeprowadzonych badań i analiz świadczy o sufozyjno-zsuwowym mechanizmie utraty stateczności, będący efektem wyżej wymienionych czynników.

6. Wnioski

Wykonane badania wykazały, że ok. 90 m odcinek brzegu Wisły wzdłuż Bulwaru Filadelfijskiego uległ awarii, polegającej na przemieszczeniu (wychyleniu) betonowych brzośców nabrzeża (palościanka) wraz z występującym powyżej obszarem skarpy (zapadlisko).

Skarpa pomiędzy umocnionym nabrzeżem a jezdnią ulicy została ukształtowana w wyniku działalności antropogenicznej. Była wielokrotnie przebudowywana a jej obecny kształt został zaprojektowany w latach 70. XX stulecia. W analizowanych przekrojach przypowierzchniową strefę tworzą nasypy niebudowlane. Wydzielone warstwy I-II tworzą różnowiekowe, o zmiennym składzie i zagęszczeniu nasypy. Materiał nasypów to mieszanina gruntów naturalnych i antropogenicznego gruzu. Szczegółowa analiza wyników badań geotechnicznych wskazuje, że przebieg poszczególnych warstw nasypów należy wiązać z zagospodarowaniem użytkowym skarpy. Z tego faktu wynika duża zmienność budowy podłoża i warunków geotechnicznych.

Aktualne problemy z użytkowaniem skarpy i nabrzeża wynikają z budowy geologicznej, oraz zmian poziomu wody w Wiśle. Grunty tworzące nasypy na obszarze analizowanej skarpy są mało odporne na zjawiska sufozji. Znaczące obniżenie poziomu wody w rzece dodatkowo uaktywniło przemieszczenia najmłodszych nasypów, które spowodowały odkształcenia brusów nabrzeża. Widoczne uszkodzenia skarpy wskazują na ich osuwiskowy charakter. Jednakże wykonane badania wskazują, że w tym przypadku przyczyny uszkodzeń są bardziej złożone. Główną przyczyną uszkodzeń są procesy sufozji wewnętrznej, oraz przemieszczenia (zsuw) na granicy różnowiekowych nasypów spotęgowanych przez utratę stateczności nabrzeża w wyniku obniżenia poziomu wody w Wiśle. Potwierdzają tę tezę stwierdzone w trakcie badań terenowych uszkodzenia skarpy w postaci zapadlisk obrębie całego bulwaru.

Obliczenia stateczności metodą MES pozwoliły określić warunki utraty równowagi zarówno, co do kształtu powierzchni poślizgu jak i jej zasięgu w stosunku do obserwowanego w terenie. Kształt powierzchni poślizgu sugeruje zsuwowy mechanizm przemieszczeń na granicy różnowiekowych nasypów. Obliczenia przemieszczeń nabrzeża w ramach ogólnej stateczności skarpy potwierdzają określone w terenie wartości odkształceń betonowego nabrzeża spiętego ocepem. Obserwowana forma zniszczenia w kontekście przeprowadzonych badań i analiz świadczy o sufozjno-zsuwowym mechanizmie utraty stateczności.

Obserwacje potwierdziły zły stan techniczny brusów (palościanki) związany z erozją betonu, korozją zbrojenia oraz licznymi szczelinami między elementami żelbetowymi.

Globalna stateczność skarpy między brzegiem Wisły a ul. Bulwar filadelfijski nie budzi zastrzeżeń. Jednakże obecny stan konstrukcji nabrzeża wskazuje na zagrożenia lokalne obejmujące obszar od umocnień brzegowych do rzędnej 37,75 m n.p.m.

Prawidłowo wykonana konstrukcja nabrzeża powinna przede wszystkim zabezpieczać brzeg przed wymywaniem gruntu. W rozpatrywanym przypadku na skutek niewystarczającej szczelności brusów oraz braku alternatywnych zabezpieczeń przed deformacjami filtracyjnymi doszło do ubytku materiału nasypowego i tym samym osłabienia konstrukcji.

Opisany przypadek wskazuje wyraźnie na konieczność prowadzenia inwentaryzacji tego rodzaju obiektów oraz ich monitorowanie, zwłaszcza po okresach powodziowych. Awarie konstrukcji nabrzeży z racji częstego występowania w obszarach miejskich mogą stwarzać realne zagrożenie dla obiektów usytuowanych w ich sąsiedztwie.

Literatura

1. PN-EN 1997-2:2008 Eurokod 7 – Projektowanie geotechniczne – Część 2: Badania podłoża gruntowego
2. Wołoszyn J., Czamara W., Eliasiewicz R., Krążel J.: Regulacja rzek i potoków, Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu, Wrocław 1994.
3. Escarameia M.: River and channel revetments. A design manual, Thomas Telford Publications, 1998.
4. Pilarczyk K. W.: Dikes and revetments. Design, maintenance and safety assessment, A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, 1998.
5. Płaza W.: Projekt wykonawczy rewitalizacji prawego nabrzeża rz. Wisły (Bulwar Filadelfijski) w Toruniu, 2007.
6. Łukasik S, Godlewski T.: Ekspertyza dotycząca osunięcia się mas ziemnych fragmentu prawego nabrzeża Wisły w Toruniu wraz z planem działań naprawczych. ITB 2012
7. Bolt A., Seminarium skarpy drogowe 155-192, IBDiM Warszawa 2010.