

Jerzy Flisiak, Sebastian Olesiak**

ANALIZA WARUNKÓW STATECZNOŚCI WAŁU OPOROWEGO SKŁADOWISKA ODPADÓW KOMUNALNYCH ORAZ PROPOZYCJE JEGO STABILIZACJI

1. Wstęp

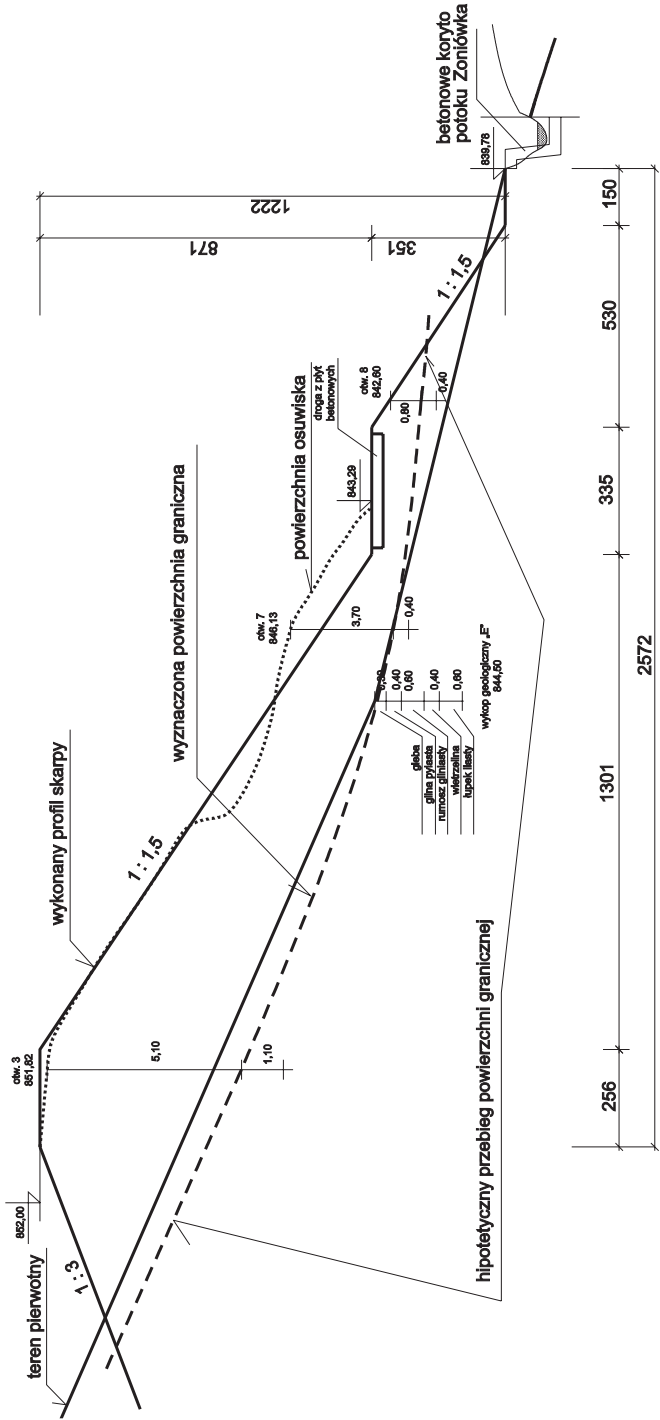
Na początku lipca 2004 roku, po intensywnych opadach deszczu, wystąpiło obsunięcie się mas ziemnych wału oporowego składowiska odpadów komunalnych „Zoniówka II” w Zakopanem. Osuwisko objęło górną skarpe wału oporowego na długości 40 m i miało charakter zsuwu asekwentnego. Wysokość skarpy wału oporowego w rejonie osuwiska wynosiła około 9 m i nachylona była pod kątem 38°. Objętość mas osuwiskowych wynosiła około 300 m³. Obsuwające się masy gruntu „zatarasowały” drogę betonową będącą jedynym połączeniem z oczyszczalnią ścieków. Całkowita utrata stateczności wału oporowego mogła doprowadzić do katastrofy budowlanej i ekologicznej, w wyniku której konieczne byłoby zamknięcie składowiska odpadów, co pozbawiłoby miasto Zakopane możliwości składowania na nim odpadów komunalnych [2].

Na prośbę użytkowników składowiska odpadów komunalnych przeprowadzono badania, których celem było określenie przyczyn powstania osuwiska, oraz zaproponowano zabezpieczenie wału oporowego składowiska odpadów. W ramach powierzonego zadania wykonano połowe badania geotechniczne, przeprowadzono analizę stateczności samego wału oporowego, przeprowadzono analizę stateczności całego składowiska wypełnionego odpadami i zrehabilitowanego zgodnie z projektem wykonawczym oraz zaproponowano zabezpieczenie tymczasowe i ostateczne wału oporowego składowiska odpadów.

2. Charakterystyka geomorfologiczna, hydrograficzna, geologiczna i hydrogeologiczna rejonu składowiska odpadów komunalnych

Składowisko odpadów stanowi fragment stromego zbocza o spadkach dochodzących do 40% i ekspozycji generalnie wschodniej. Powierzchnia składowiska nie posiada naturalnego ukształtowania, jest uformowana tarasowo i częściowo wypełniona odpadami komunalnymi.

* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków



Rys. 1. Przekrój przez wał oporowy składowiska

Wał oporowy (rys. 1) został uformowany jako nasyp o jednej skarpie wewnętrznej, której nachylenie zgodnie z projektem powinno wynosić 1:3, i układzie dwóch skarp zewnętrznych o nachyleniu 1:1,5. Skarpy zewnętrzne rozdzielone są półką szerokości 4 m, położoną około 3,5 m powyżej dna potoku Zoniówka. Na półce znajduje się droga wykonana z płyt betonowych. Korona wału oporowego o projektowanej szerokości 2 m znajduje się na wysokości 852 m n.p.m., tj. około 12 m powyżej dna potoku Zoniówka [1].

Sieć hydrograficzna jest dobrze rozwinięta poprzez liczne przecięcia dolinami erozyjnymi związanymi z okresowymi potokami, powstającymi w okresie intensywnych opadów i roztopów. Sam potok Zoniówka stanowi dren odprowadzający wody opadowe i roztopowe i został uregulowany poprzez zabudowę jego koryta elementami betonowymi. Jedynym elementem odwodnieniowym wału oporowego jest koryto wykonane z elementów betonowych znajdujące się obok drogi od strony zbocza, z którego wody odprowadzane są bezpośrednio do potoku Zoniówka [1].

Utwory czwartorzędowe stanowiące podłoże wału oporowego oraz samego składowiska odpadów wykształcone są w postaci glin, glin zwięzłych i ilów. Warstwa ta znajduje się bezpośrednio pod cienką warstwą gleby. Miąższość tych utworów nie przekracza 2 metrów. Bezpośrednio pod utworami gliniastymi znajduje się warstwa wietrzelin i rumoszu gliniastego o miąższości wahającej się od 0,3 do 1,6 m. Trzeciorząd jest reprezentowany przez utwory fliszu karpackiego wykształcone w postaci szarych łupków ilastych i piaskowców. Strop utworów trzeciorzędowych występuje na głębokościach od 1,1 do 3,6 m. Wał oporowy wykonany jest z gruntu rodzimego przetransportowanego z miejsc, gdzie wykonywane było tarasowanie zbocza naturalnego [1].

Na badanym terenie stwierdzono występowanie wód powierzchniowych oraz wód gruntowych w obrębie utworów czwartorzędowych. Wody gruntowe mają charakter sączeniowy, związany z przepuszczalnymi partiami w obrębie utworów gliniastych składowiska i wału oporowego. Ich intensywność i wydajność związana jest z warunkami atmosferycznymi. Wody powierzchniowe są reprezentowane przez wody opadowe i roztopowe. Mają one jednak duży wpływ na warunki stateczności ze względu na położenie geograficzne Zakopanego o rocznej średniej opadów wynoszącej 1120 mm, z których większość przypada na czerwiec, lipiec i sierpień. Głównym ciekim powierzchniowym jest potok Zoniówka (Orawców Potok), prowadzący zmienne ilości wody w zależności od warunków atmosferycznych [1].

3. Połowe badania geotechniczne

Analiza stateczności została poprzedzona geotechnicznymi badaniami polowymi, których celem było określenie parametrów fizyko mechanicznych gruntów budujących wał oporowy i warstwy rodzime.

Badania geotechniczne obejmowały sondowania sondą wkręcaną WST (Viktsonda), wierceń zestawem świrdrów ręcznych z równoczesną oceną makroskopową gruntów oraz pomiary oporu ścinania przy użyciu sondy obrotowej FVT-14.05.

W ramach ekspertyzy wykonano:

- trzynaście sondowań badawczych z użyciem sondy wkręcanej Viktsonda o głębokości od 1,20 do 6,30 m,
- pięć wierceń przy użyciu zestawu świrdrów ręcznych firmy Eijkelkamp o głębokości od 1,60 do 2,30 m,
- kilkadziesiąt sondowań badawczych z użyciem sondy obrotowej FVT,
- kilkadziesiąt polowych makroskopowych badań próbek gruntu.

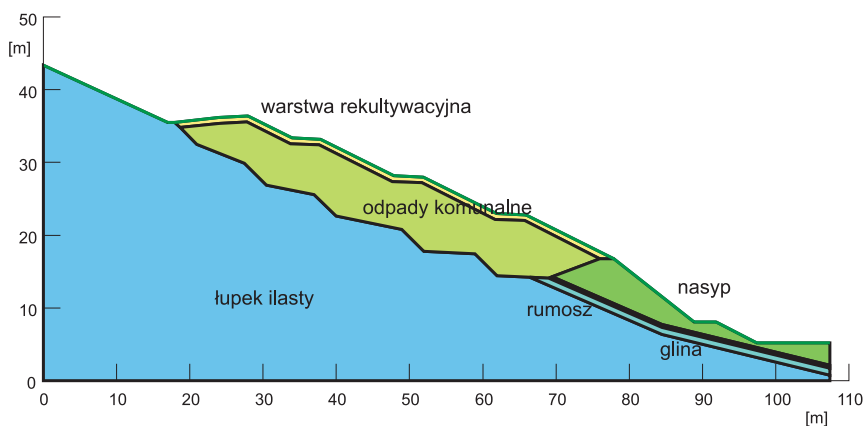
Wyniki badań geotechnicznych przedstawiono na kartach dokumentacyjnych otworów geotechnicznych, na których w sposób graficzny zilustrowano wyniki sondowań wraz z ich interpretacją oraz profile litologiczne z pełnym opisem właściwości badanych gruntów.

Na podstawie sondowań i wierceń sporządzono trzy przekroje geotechniczne prostopadłe do górnej krawędzi wału w odległościach około 20 m od siebie oraz jeden wzdłuż korony wału.

Na przekrojach tych zaznaczono:

- pierwotny profil powierzchni terenu wyznaczony na podstawie dokumentacji geologicznej,
- profil wykonanego zbocza wału oporowego na podstawie aktualnych pomiarów geodezyjnych,
- aktualny profil powierzchni osuwiska,
- wyznaczoną na podstawie sondowań powierzchnię poślizgu.

Przekroje te posłużyły do analizy stateczności i stanowiły podstawę dla budowy modelu (rys. 2).



Rys. 2. Przekrój przez składowisko odpadów (sytuacja w momencie zamykania składowiska) w miejscu największych uszkodzeń wału oporowego

W wyniku przeprowadzonych polowych badań geotechnicznych stwierdzono, że wał oporowy wykonany jest z glin przemieszanych z materiałem skalnym (łupki ilaste i piaskowce). Przypowierzchniowe gliny budujące wał oporowy znajdują się w **stanie miękkoplastycznym**, przechodzącym wraz ze wzrostem głębokości w **stan plastyczny**. Dotyczy to całego wału oporowego, tj. korony wału, skarpy i półki, na której znajduje się droga. Dopiero na głębokości odpowiadającej położeniu naturalnego podłoża grunty przechodzą w stan plastyczny, a następnie twardoplastyczny o stopniu plastyczności większym od 0,25.

4. Analiza stateczności składowiska

Składowisko odpadów komunalnych Zoniówka w Zakopanem jest składowiskiem typu stokowego. Z takim typem składowisk wiążą się znaczne problemy natury geotechnicznej, dotyczące jego stateczności. Projektanci składowiska odpadów ową stateczność chcieli zapewnić poprzez odpowiednie uformowanie podłoża składowiska (tarasy), wykonanie wału oporowego zabezpieczającego skarpe z odpadami przed splywem do potoku Zoniówka oraz odpowiednie wyprofilowanie ostatecznej skarpy z odpadami. W tak zaprojektowanym składowisku odpadów wał oporowy stanowi najważniejszą, ze względów konstrukcyjnych, część składowiska odpadów.

W lipcu 2004 roku doszło jednak do uszkodzenia wału oporowego, pomimo że składowisko jest dopiero w początkowej fazie wypełniania (aktualnie wypełniana jest nisza w dolnej części składowiska, której pojemność stanowi około 5% jego całkowitej pojemności).

Analizę stateczności przeprowadzono, posługując się oprogramowaniem Slope/W przeznaczonym do oceny stateczności metodami równowagi granicznej. Sprawdzenie stateczności zbocza lub skarpy polega na obliczeniu minimalnego wskaźnika stateczności przy zastosowaniu odpowiedniej metody obliczeniowej, z uwzględnieniem geometrii układu warstw, przebiegu poziomów wód gruntowych oraz odpowiednich parametrów gruntowych. Tak wyznaczony wskaźnik stateczności powinien być większy niż dopuszczalny dla danej metody obliczeniowej i ważności obiektu geotechnicznego $F_{\min} > F_{\text{dop}}$ [3].

W przypadku budowli ziemnych zakwalifikowanych do II kategorii geotechnicznej (między innymi skarp o wysokościach do 8 m) przyjmować należy $F_{\text{dop}} = 1,5$.

Parametry fizykomechaniczne gruntów do analizy wyznaczono na podstawie PN-81/B-03020 przy zastosowaniu metody B. Parametry wyjściowe dla naturalnych gruntów podłoża uzyskano z dokumentacji warunków hydrologicznych i geologiczno-inżynierskich terenu przeznaczonego pod budowę wysypiska odpadów „Zoniówka II” dla Zakopanego.

Parametry gruntowe nasypu określono w trzech wariantach A, B i C (tab. 1), zakładając, iż jest on wykonany z glin w trzech stanach:

- A — twardoplastycznym, zgodnym z dokumentacją projektową,
- B — plastycznym, pośrednim pomiędzy dokumentacją projektową a wynikami badań geotechnicznych,
- C — miękkoplastycznym, wynikającym z badań geotechnicznych.

TABELA 1

Parametry fizykomechaniczne gruntów przyjęte do obliczeń (wartości obliczeniowe)

Nazwa gruntu	Gęstość objętościowa ρ , t/m^3	Kąt tarcia wewnętrznego ϕ , $^\circ$	Spójność c , kPa
Nasyp gliniasty wariant A , stan twardoplastyczny $I_L = 0,125$	2,37	18,00	31,50
Nasyp gliniasty wariant B , stan plastyczny $I_L = 0,375$	2,26	13,50	23,40
Nasyp gliniasty wariant C , stan miękkoplastyczny $I_L = 0,75$	2,15	7,20	14,40
Gлина pylasta (0,4 m), stan twardoplastyczny $I_L = 0,125$	2,31	18,00	31,50
Rumosz gliniasty (1,0 m), stan twardoplastyczny $I_L = 0,25$	2,42	15,80	27,00
Odpady komunalne	1,21	19,80	10,80
Warstwa rekultywacyjna	1,76	3,15	12,96

Parametry fizykomechaniczne odpadów komunalnych charakteryzują się bardzo dużą indywidualnością dla każdego składowiska. Mają charakter zmienny w czasie, powodujący, że wraz z jego upływem dochodzi do zmniejszenia parametrów wytrzymałościowych i zwiększenia gęstości objętościowej odpadów.

Na podstawie danych literaturowych można przyjąć dla odpadów „starych” następujące przedziały zmienności parametrów fizykomechanicznych [4]:

- gęstość objętościowa $0,8 \div 1,4 \text{ g/cm}^3$,
- kąt tarcia wewnętrznego $19 \div 24^\circ$,
- spójność $5 \div 20 \text{ kPa}$.

Ze względu na to, iż utrata stateczności wału oporowego wystąpiła w niewypełnionym składowisku odpadów, w pierwszej kolejności przeprowadzono analizę oceny stateczności samego wału oporowego. W drugim etapie analizowano stateczność składowiska wypełnionego w całości odpadami i przykrytego warstwą rekultywacyjną.

Analizowano również stateczność samych odpadów. Wyniki obliczeń w przekroju 1 (rys. 1), przeprowadzonych dla trzech wariantów (A, B, C) o zróżnicowanych własnościach gruntów, z jakich wykonany jest wał oporowy zgodnie z tabelą 1, zebrano w tabeli 2.

TABELA 2

Zestawienie wyników analizy stateczności wału oporowego i składowiska odpadów

Wskaźniki stateczności	Metoda Felleniusa	Metoda Bishopa	Metoda Janbu	Metoda Morgensterna – Prince'a
Sam wał oporowy — wariant A	1,513	1,560	1,494	1,560
Całe składowisko — wariant A	1,359	1,422	1,330	1,417
Sam wał oporowy — wariant B	1,416	1,440	1,382	1,439
Całe składowisko — wariant B	1,169	1,203	1,161	1,198
Sam wał oporowy — wariant C	0,862	0,873	0,854	0,873
Całe składowisko — wariant C	0,749	0,756	0,754	0,757
Odpady komunalne	1,591	1,663	1,567	1,661

Uzyskane wyniki dla wariantu A wskazują, że według wszystkich wykorzystanych metod analizy wartości wskaźników stateczności wału oporowego i składowiska zawarte są w przedziale: $1,3 < F_S < 1,5$, a wskaźniki stateczności samego wału oporowego (bez uwzględnienia oddziaływania składowiska) są większe od 1,5.

Można więc stwierdzić, że w przypadku prawidłowego wykonania wału oporowego zgodnie z projektem wystąpienie procesów osuwiskowych byłoby mało prawdopodobne lub bardzo mało prawdopodobne.

Należy jednocześnie podkreślić, że żaden ze wskaźników stateczności nie osiąga wartości minimalnej, przewidywanej dla tego typu obiektów, która wynosi 1,5. Ponieważ jednak różnice pomiędzy wartością minimalną a uzyskaną z obliczeń metodami Bishopa i Morgensterna – Price'a są niewielkie (ok. 5%), można przyjąć, że z punktu widzenia stateczności skarp projekt składowiska wykonany był prawidłowo, a przyczyną wystąpienia osuwiska wału oporowego były błędy wykonawcze.

Stwierdzenie to potwierdza analiza stateczności samego zbocza z odpadami komunalnymi, dla którego wartości wskaźników stateczności są większe od 1,5. Wynika z niej, że przy założonych parametrach fizykomechanicznych odpadów komunalnych oraz geometrii zbocza wskaźniki stateczność są znacznie wyższe od wartości minimalnej. Dzięki temu nie zachodzi potrzeba zmiany generalnego kąta nachylenia składowiska odpadów ani kształtu jego przekroju.

Zgodnie z wynikami dla wariantu C, w którym wał oporowy budują gliny w stanie miękoplastycznym, czyli dla sytuacji, którą wykazały badania geotechniczne, według wszystkich wykorzystanych metod analizy wartości wskaźników stateczności wału oporowego i składowiska są mniejsze od wartości 1,0.

5. Propozycja zabezpieczenia wału oporowego składowiska odpadów konstrukcją gabionową

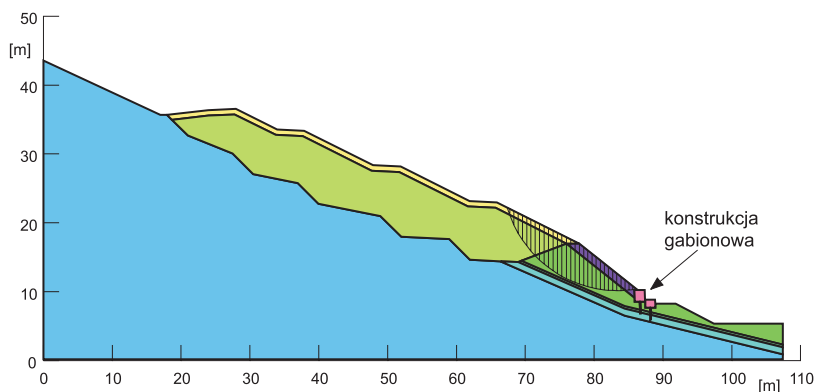
Projekt stabilizacji wału oporowego składowiska odpadów stalową konstrukcją gabionową zaproponowała jedna z krakowskich firm geotechnicznych. W projekcie tym proponowane jest wykonanie dwóch rzędów gabionów stalowych o wymiarach $1,2 \times 1,5 \times 3,0$ m wypełnionych kruszywem łamanym oraz koszy siatkowo-kamiennych o wymiarach $0,5 \times 1,5 \times 3,0$ m. Ze względu na możliwość przesunięcia konstrukcji oporowej proponowane jest dodatkowe zakotwienie dolnego rzędu gabionów palami stalowymi o długości 2,0 m w rozstawie 1,5 m i górnego rzędu gabionów palami drewnianymi o długości 1,5 m w ilości 4 pale na jeden gabion. Projekt ten nie zawierał jednak analizy stateczności i tym samym nie odpowiadał na podstawowe pytanie, czy tak zabezpieczone składowisko będzie stateczne.

Projekt przewidywał również, że materiał z koluwium powinien być wymieniony, a powierzchnia skarpy wału winna być wyrównana, dogęszczona i wypełniona materiałem o dobrych parametrach filtracyjnych i wytrzymałościowych na głębokość co najmniej 1,20.

Analizę przeprowadzono w dwóch wariantach B i C. Wyniki analizy przedstawiono w tabeli 3, a przekrój przez składowisko wraz z zaznaczoną powierzchnią poślizgu dla metody Bishopa dla wariantu C przedstawia rysunek 3.

Analiza uzyskanych wyników wskazuje, że zastosowanie gabionowej konstrukcji zabezpieczającej przyczynia się do poprawy warunków stateczności skarp wału oporowego i składowiska odpadów. W przypadku gdy grunty, z których wykonany jest nasyp, doprowadzone zostaną do konsystencji plastycznej, wartości wskaźników stateczności są jedynie minimalnie niższe od wymaganych dla tego typu konstrukcji.

Jeżeli sama konstrukcja gabionowa oraz odpowiednio usytuowany system drenażu zarówno przed, jak i za konstrukcją z gabionu nie spowodują osuszenia gruntu, niezbędne będzie wykonanie systemu drenaży przyporowych.



Rys. 3. Przekrój przez składowisko zabezpieczone konstrukcją gabionową wraz z wyznaczoną powierzchnią poślizgu

TABELA 3

Wartości wskaźników stateczności składowiska zabezpieczonego konstrukcją gabionową

Wskaźniki stateczności	Metoda Felleniusa	Metoda Bishopa	Metoda Janbu	Metoda Morgensterna – Prince'a
Zabezpieczenie gabionem — wariant B	1,426	1,477	1,401	1,473
Zabezpieczenie gabionem — wariant C	1,003	1,055	1,020	1,062

6. Podsumowanie

W ramach omawianej pracy przeprowadzono kilkudziesiąt analiz stateczności z zastosowaniem różnych konstrukcji oporowych. Przeanalizowano różne kształty i geometrie konstrukcji gabionowych oraz możliwość zastosowania lekkich konstrukcji oporowych umiejscowionych u podnóża wału oraz w jego koronie. Z obliczeń i analiz tych wynika, że główną przyczyną niestateczności wału oporowego jest niewłaściwy stan gruntów, z których jest on wykonany. Żadna konstrukcja oporowa nie zapewnia bowiem odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa, gdy wał oporowy budują gliny w stanie miękkoplastycznym (wskaźniki stateczności są mniejsze od 1,0). Gdyby nasyp wykonany był z odpowiednio zagęszczonych gruntów spoistych w stanie twardoplastycznym, wystąpienie procesów osuwiskowych byłoby mało lub bardzo mało prawdopodobne. Z tego względu podstawową metodą zabezpieczenia aktualnej i przyszłej stateczności skarp składowiska i wału oporowego powinno być zmniejszenie wilgotności gruntów budujących nasyp.

LITERATURA

- [1] Dokumentacja warunków hydrologicznych i geologiczno-inżynierskich terenu przeznaczonego pod budowę wysypiska odpadów „Zoniówka II” dla Zakopanego. Gorlice, „Dempol”, lipiec 1997
- [2] Instrukcja obserwacji i badań osuwisk drogowych. Warszawa, GDDP 1999
- [3] *Krahn J.*: Stability modeling with Slope/W. Geo-Slope/W International LTD 2004
- [4] *Pisarczyk S.*: Grunty nasypowe. Właściwości geotechniczne i metody ich badania. Warszawa, OWPW 2004