

## WYZNACZANIE PARAMETRÓW WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH GRUNTÓW Z WYKORZYSTANIEM ANALIZY WSTECZNEJ DO PROJEKTU ZABEZPIECZENIA OSUWISKA

Piotr Paprocki, Tomasz Kołanka, Sławomir Gawalko,  
Adrian Gańko

Geoteko Projekty i Konsultacje Geotechniczne Sp. z o.o., Warszawa

**Streszczenie.** W II kwartale 2010 roku, po wystąpieniu nawałnych opadów atmosferycznych, na terenie całego kraju (głównie w części południowej) doszło do uaktywnienia się dużej liczby osuwisk powodujących zniszczenia w infrastrukturze i zabudowie. Spowodowało to konieczność dokumentowania warunków geotechnicznych na obszarach osuwiskowych do opracowania projektów zabezpieczeń terenów zagrożonych lub zniszczonych przez osuwiska. Proces projektowania geotechnicznego wymaga ustalenia rzeczywistych wartości parametrów wytrzymałościowych gruntów występujących w obrębie skarpy głównej i koluwium osuwiska. W artykule przedstawiono sposób wyznaczenia parametrów wytrzymałościowych na podstawie badań bezpośrednich (aparatury trójosiowej) zweryfikowanych wsteczną analizą stateczności skarpy (zbocza) przy wykorzystaniu numerycznych metod obliczeniowych. Podstawę do przeprowadzenia analizy wstecznej (*back analysis*) stanowiły pomiary geodezyjne (dane geometryczne skarpy przed wystąpieniem i w trakcie rozwoju osuwiska) oraz badania geotechniczne wykonywane w ramach sporządzenia dokumentacji geologiczno-inżynierskiej dla osuwiska w obrębie Karpat Fliszowych.

**Słowa kluczowe:** analiza wsteczna, osuwisko, obliczenia stateczności, badania geotechniczne, parametry geotechniczne

### WSTĘP

Celem wykonywania badań geotechnicznych jest przede wszystkim ustalanie wartości parametrów fizycznych i mechanicznych badanych gruntów. Badania geotechniczne mogą być wykonywane w warunkach *in situ* (badania terenowe) oraz jako badania laboratoryjne (badania próbek gruntu). W niektórych przypadkach istnieje możliwość

---

Adres do korespondencji – Corresponding author: Piotr Paprocki, Geoteko Projekty i Konsultacje Geotechniczne Sp. z o.o., ul. Wałbrzyska 3/5, 02-739 Warszawa, e-mail: piotr.paprocki@geoteko.com.pl

obliczeniowego sprawdzenia określonych na drodze badań wielkości parametrów. Takie możliwości daje tzw. analiza wsteczna (*back analysis*), która polega na przeprowadzeniu obliczeń dla konkretnej zaistniałej sytuacji (np. utrata stateczności skarpy), przy wyjściowym założeniu wielkości parametrów otrzymanych z badań geotechnicznych i iteracyjnych zmianach tych parametrów dla numerycznego odwzorowania pożądanego schematu statycznego.

Klasycznym przykładem zastosowania analizy wstecznej są obliczenia geotechniczne stateczności zbocza w sytuacji wystąpienia osuwiska. W dalszej części artykułu przedstawiono przypadek osuwiska zlokalizowanego na południu Polski (Karpaty Fliszowe), przy którego dokumentowaniu wykorzystano analizę wsteczną do określenia wielkości parametrów wytrzymałościowych gruntów koluwium. Charakterystyka osuwiska została zaczerpnięta z karty informacyjnej osuwiska [Wójcik 2010] oraz dokumentacji geologiczno-inżynierskiej [Paprocki i in. 2011] opracowanej przez Geoteko Projekty i Konsultacje Geotechniczne Sp. z o.o. Badania geotechniczne i obliczenia stateczności stanowiły elementy dokumentacji geologiczno-inżynierskiej.

## CHARAKTERYSTYKA OSUWISKA I BUDOWY GEOLOGICZNEJ

Obszar aktywnego osuwiska w części skarpy głównej obejmuje tereny zurbanizowane, w tym fragment zniszczonej drogi lokalnej długości około 55 m. Długość skarpy głównej aktywnego osuwiska wynosi 247 m, wysokość skarpy – od 2,5 do 10,8 m. Widok skarpy głównej aktywnego osuwiska przedstawiono na rysunku 1. Obszar koluwium o powierzchni około 2,2 ha obejmuje działki niezabudowane, stanowiące nieużytki rolne. Powierzchnia koluwium jest nierówna, nieregularnie pofałdowana, z licznymi zagłębieniami wypełnionymi wodą. Do obszaru aktywnego osuwiska od strony południowo-wschodniej i zachodniej przylegają osuwiska nieaktywne. W dole zbocza obszar osuwiska ogranicza dolina niewielkiego ciek wodnego. Łącznie analizowany obszar, na którym wystąpiły ruchy mas ziemnych, zajmuje powierzchnię około 9 ha.



Rys. 1. Widok skarpy osuwiska

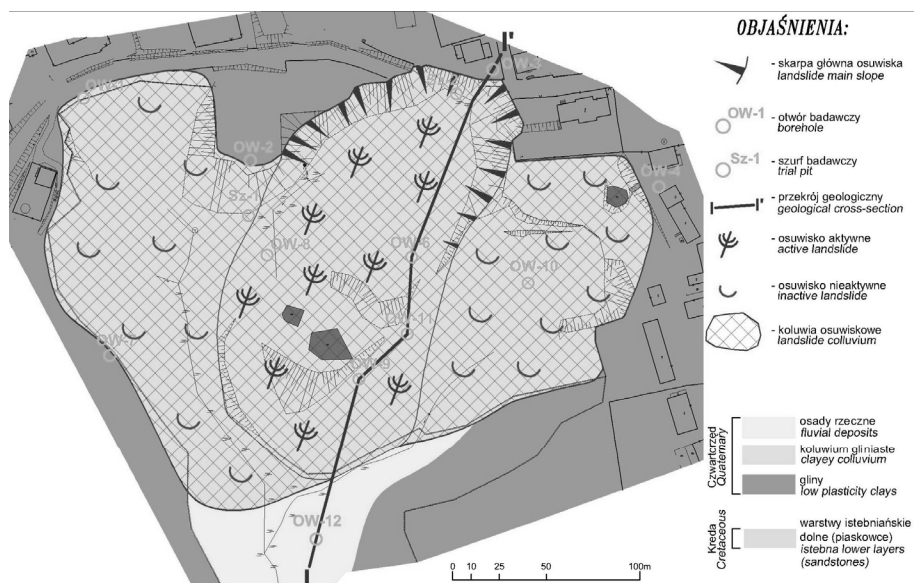
Fig. 1. View of the slope of the landslide

Analizowane osuwisko znajduje się w obrębie płaszczowiny śląskiej, która stanowi główną jednostkę tektoniczną Karpat Fliszowych. Występują tu kredowe i trzeciorzędowe utwory wydzielone jako warstwy istebniańskie górne i dolne. Warstwy istebniańskie dolne wykształcone są jako piaskowce, zlepieńce i łupki. Utwory te stwierdzono w obrębie skarpy głównej osuwiska i powyżej.

Warstwy istebniańskie górne wykształciły się jako łupki (tzw. łupki dolne i górne), przedzielone wtrąceniami i soczewkami piaskowców. W rejonie osuwiska występują łupki dolne, wieku senon-paleocen, które zostały wykształcone jako ciemnoszare zapiaszczone łupki ilaste z muskowitem oraz wkładkami cienkich ławic piaskowców. Warstwy te zapadają pod kątem około  $10^\circ$ , głównie w kierunku SSW.

Nadkład czwartorzędowy stanowią gliny lessopodobne (eluvia), gliny zboczowe (deluvia) oraz gliny zwietrzelinowe. Miąższość nienaruszonych utworów czwartorzędowych wynosi 4–5 m.

Koluwia osuwiskowe stanowią mieszaninę glin zwietrzelinowych i lessopodobnych z rumoszem piaskowców i łupków o zróżnicowanym stanie (plastyczne, twaroplastyczne) i miąższości dochodzącej do 12 m. Mapę warunków geotechnicznych w rejonie osuwiska przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Mapa warunków geotechnicznych w rejonie analizowanego osuwiska

Fig. 2. Map of the geotechnical conditions within the area of analysed landslide

Czwartorzędowy poziom wodonośny związany jest z utworami koluwialnymi, które są zasilane i nawadniane wodami opadowymi infiltrującymi i spływającymi po stropie łupków. Wycieki i wysięki tych wód można obserwować u podnóża skarpy głównej. Największe zawodnienie gruntów występuje w górnej części osuwiska w pobliżu skarpy głównej.

Poziom wodonośny w utworach fliszowych występuje w strefie warstw istebniańskich górnych i związany jest głównie z wkładkami silnie spekanymi piaskowców

w strefie łupków dolnych na głębokości około 12 m p.p.t. [Paprocki i in., 2011]. Wody te wykazują charakter artezyjski i stabilizują się powyżej powierzchni terenu.

## METODYKA BADAŃ GEOTECHNICZNYCH

W celu udokumentowania stanu gruntów w obrębie osuwiska wykonane zostały terenowe i laboratoryjne badania geotechniczne [Paprocki i in. 2011]. Na zakres prac terenowych składały się: wiercenia z pełnym rdzeniowaniem, szurfy badawcze, badania geofizyczne metodą elektrooporową, pomiary geodezyjne oraz kratowanie geologiczno-inżynierskie obszaru osuwiska. Badania laboratoryjne obejmowały badania właściwości fizycznych i mechanicznych próbek gruntu.

Prawidłowe udokumentowanie warunków geotechnicznych w rejonie osuwiska wymagało ustalenia przebiegu płaszczyzny poślizgu. Przebieg płaszczyzny poślizgu został ustalony na podstawie analizy rdzeni uzyskanych z otworów badawczych. Zastosowana technika wiercenia pozwala na pełny uzysk rdzenia w obrębie utworów zwietrzelinowych i fliszowych oraz wyznaczenie strefy przebiegu płaszczyzny poślizgu. Na rysunku 3 przedstawiono przykładowy rdzeń wiertniczy z zaznaczoną strefą występowania płaszczyzny poślizgu.



Rys. 3. Rdzeń wiertniczy z widoczną płaszczyzną poślizgu

Fig. 3. Drilling core with noticeable slip plane

Wyznaczenie w sposób bezpośredni parametrów wytrzymałościowych ( $\varphi'$  i  $c'$ ) uznano za kluczowe dla prawidłowego odtworzenia warunków wystąpienia osuwiska i przeanalizowania stateczności zbocza. W tym celu przeprowadzono badania próbek gruntu (o nienaruszonej strukturze) w aparacie trójosiowego ściskania. Badania trójosiowe zostały przeprowadzone zgodnie z procedurą badawczą GEOTEKO PB-3 [Badania... 2007], opartą na specyfikacji technicznej ISO/TS 17892-9:2004. Do badań wytrzymałościowych wybierano ten segment rdzenia, który nie zawierał wyraźnych zluźnień oraz laminacji i został oceniony jako najmniej naruszony. Parametry wytrzymałościowe wyznaczano w odniesieniu do ścieżek naprężeń efektywnych. Ze względu na fakt, że badane próbki gruntu były kruche i wykazywały spękania, wartości spójności przyjmowane do obliczeń należało zredukować. Rozpatrując całą warstwę zawierającą spękania i powierzchnie zluźnień, należy stwierdzić, że przyjęcie dużych wartości spójności byłoby niereprezentatywne.

tywne do obliczeń stateczności. Nawiązując do zaleceń Eurokodu 7, należy zaznaczyć, że dla gruntów prekonsolidowanych obwiednia zniszczenia nie jest linią prostą i największa nieliniowość występuje w zakresie małych naprężeń.

## OCENA WARUNKÓW GEOTECHNICZNYCH

Podstawą do oceny warunków geotechnicznych w rejonie analizowanego osuwiska były wyniki badań terenowych i laboratoryjnych oraz wyniki kartowania geologiczno-inżynierskiego. Zgodnie z informacjami podanymi w karcie dokumentacyjnej osuwiska [Wójcik 2010], osuwisko rozwinęło się w maju 2010 roku, przy czym jego dalszy rozwój (kolejne zsuwy mas ziemnych) zanotowano w czerwcu i lipcu 2010 roku. Od lipca 2010 roku nie nastąpił dalszy rozwój osuwiska (zatrzymanie przesuwania się górnej krawędzi skarpy w górę zbocza). Zgodnie z ustaleniami podanymi w karcie informacyjnej osuwiska [Wójcik 2010] oraz z wynikami prac zawartymi w dokumentacji geologiczno-inżynierskiej [Paprocki i in. 2011], osuwisko ma charakter skalno-zwietrzelinowy, jest aktywne i nadal stwarza zagrożenie dalszego rozwoju (przemieszczanie się skarpy głównej osuwiska w górę zbocza).

W podłożu gruntowo-skalnym badanego terenu, w części położonej powyżej skarpy głównej aktywnego osuwiska, pod warstwą glin lessopodobnych do głębokości 8 m p.p.t. występuje zwietrzelina gliniasta w stanie twaroplastycznym (rys. 2). W trakcie wierceń w otworach wykonanych powyżej skarpy głównej w obrębie zwietrzeliny stwierdzono występowanie stref gruntów o zwiększonej przepuszczalności, gdzie notowano całkowitą utratę płuczki [Paprocki in. 2011]. Są to strefy gruntów, które w okresie infiltracji wód opadowych stanowią uprzywilejowane drogi przepływu wód gruntowych. Poniżej zwietrzeliny w podłożu występują łożyska przewarstwione piaskowcem (flisz).

Na obszarze koluwium (rys. 2) wyróżniono grunty spoiste oraz przemieszczoną w wyniku procesu osuwiskowego stropową warstwę podłoża fliszowego. Grunty koluwium (o miąższości od około 6 m, a u podnóża skarpy maksymalnie do około 12 m) zalegają na warstwie nienaruszonego fliszu, zapadającej pod kątem około 10° w kierunku SSW. Na podstawie wyników badań terenowych (wiercenia, badania geofizyczne) za płaszczyznę poślizgu przyjęto strefę przewarstwień skruszonego piaskowca o zredukowanych parametrach wytrzymałościowych, występującą w stropowej części podłoża fliszowego na głębokości od 6 do 12 m poniżej powierzchni terenu w obszarze koluwium. Charakterystyczne dla tej strefy jest jej nawodnienie – przebiegowi płaszczyzny poślizgu odpowiada występowanie wód gruntowych pod napięciem hydrostatycznym lub intensywnych sączeń. W obliczeniach stateczności zbocza przeanalizowano również możliwość wystąpienia poślizgu na styku zwietrzeliny i podłoża fliszowego.

Czoło osuwiska od południa ogranicza dolina wypełniona osadami rzecznyymi, wcięta erozyjnie w starsze podłoże na głębokość około 6,5 m (rys. 2). Grunty wypełniające dolinę stanowią utwory pylaste i grunty organiczne.

Stwierdzony aktywny proces osuwiskowy należy uznać za grożący dalszym rozwojem. Warunki gruntowe w rejonie osuwiska, zgodnie z normą PN-EN 1997-2:2009, należy uznać za skomplikowane.

## METODYKA ANALIZY STATECZNOŚCI ZBOCZA I WERYFIKACJI PARAMETRÓW

Analizę stateczności skarpy zbocza przeprowadzono przy wykorzystaniu programu komputerowego GeoStudio 2007 (moduł SLOPE/W do obliczeń stateczności). Do obliczeń zastosowano metodę numeryczną GLE (General Limit Equilibrium), stanowiącą rozwiązanie równania równowagi. Metoda ta zawiera w sobie kluczowe elementy większości klasycznych metod stosowanych przy analizie stateczności. Współczynnik stateczności ( $F$ ) w metodzie GLE obliczany jest na podstawie następujących wzorów:

- równanie momentów

$$F_m = \frac{\sum(c'\beta R + (N - u\beta)R \tan\phi')}{\sum Wx - \sum Nf \pm \sum Dd} \quad (1)$$

- równanie sił

$$F_f = \frac{\sum(c'\beta \cos\alpha + (N - u\beta) \tan\phi' \cos\alpha)}{\sum N \sin\alpha - \sum D \cos\omega} \quad (2)$$

gdzie:  $c'$  – efektywna wartość spójności,

$\phi'$  – efektywna wartość kąta tarcia wewnętrznego,

$u$  – wartość ciśnienia wody w porach,

$N$  – siła normalna do podstawy paska,

$W$  – ciężar paska,

$D$  – obciążenie,

$\beta, R, x, f, d, \omega$  – parametry geometryczne,

$\alpha$  – nachylenie podstawy paska do poziomu.

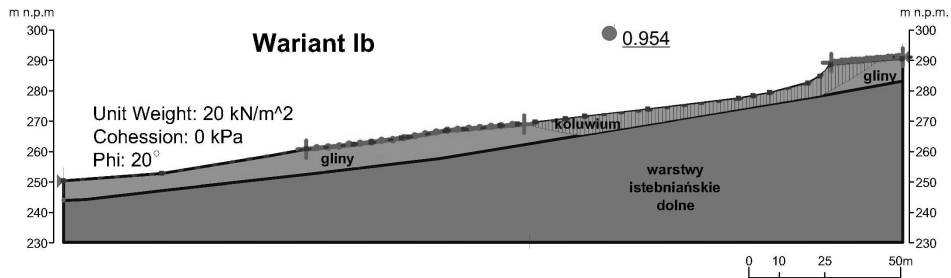
Cel obliczeń stateczności analizowanej skarpy osuwiska był podwójny. Po pierwsze wykonana została tzw. analiza wsteczna, pozwalająca na ustalenie parametrów geotechnicznych w momencie wystąpienia osuwiska (dla warunku  $F < 1$ ), a następnie przeprowadzone zostały obliczenia stateczności dla stanu zbocza po wystąpieniu osuwiska, przy wykorzystaniu parametrów gruntów uzyskanych z badań laboratoryjnych i zweryfikowanych na drodze obliczeniowej (analiza wsteczna).

Obliczenia przeprowadzono dla następujących wariantów:

- warianty Ia i Ib – analiza wsteczna, przy odwzorowanej (na podstawie map) geometrii zbocza przed wystąpieniem osuwiska, płaszczyzna poslizgu na granicy zwietrzliny i fliszu,
- warianty IIa i IIb – stan ukształtowania zbocza po wystąpieniu osuwiska; koncepcyjnie przyjęta płaszczyzna poslizgu wzdłuż granicy zwietrzliny i podłoża fliszowego, w tym: IIa – woda gruntowa według danych z badań, IIb – zawodnienie gruntów w strefie skarpy i koluwium,
- warianty IIIa i IIIb – stan ukształtowania zbocza po wystąpieniu osuwiska, płaszczyzna poslizgu w obrębie stropowej części warstwy fliszu, w tym: IIIa – parametry wytrzymałościowe przyjęte z badań trójosiowych, IIIb – zredukowane parametry wytrzymałościowe na podstawie analizy wstecznej (*back analysis*).

Linia przekroju, dla którego prowadzono wariantowe obliczenia stateczności zbocza, obejmuje swym zasięgiem całość osuwiska (linia przekroju pokrywa się z linią przekroju geologicznego pokazanego na rysunku 2). Różnica wysokości w granicach linii przekroju obliczeniowego wynosi około 41 m.

W założeniach do przeprowadzenia analizy wstecznej (warianty I i II) przyjęto niekołowy kształt krzywej poślizgu, co pozwoliło na wymodelowanie utraty stateczności zbocza poprzez przyjęcie płaszczyzny poślizgu na linii ukształtowania się skarpy głównej osuwiska i dalej wzdłuż koncepcyjnie założonej płaszczyzny, na linii styku warstwy zwietrzliny z warstwą fliszu. W wariantie III niekołowa powierzchnia poślizgu została przyjęta na linii ukształtowania się skarpy głównej osuwiska i dalej w obrębie części stropowej podłoża fliszowego, tj. w warstwie iłolupków, w strefie przewarstwień piaskowca, ze stwierdzonymi przejawami przepływu wód gruntowych. Schemat obliczeniowy dla warunku utraty stateczności przy zredukowanych parametrach wytrzymałościowych gruntów koluwium przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat obliczeniowy odtwarzający utratę stateczności skarpy  
Fig. 4. Calculation scheme showing the loss of stability

W analizie wstecznej poziom wody gruntowej zarówno w górnej strefie skarpy, jak i u jej podnóża został przyjęty na równi z terenem, co jest zasadne przy założeniu zawodnienia skarpy w wyniku nawałnych opadów atmosferycznych, które wystąpiły na początku maja 2010 roku. Podobne założenie całkowitego zawodnienia gruntu zostało przyjęte dla wariantu obliczeniowego III (jako najmniej korzystne dla stateczności analizowanej skarpy).

W wariantie obliczeniowym IIb poziom wody gruntowej został przyjęty na podstawie rzeczywistych pomiarów wykonanych w trakcie prowadzenia badań terenowych [Paprocki in. 2011].

## WYNIKI BADAŃ

Zasadniczym celem przeprowadzonej analizy wstecznej (warianty obliczeniowe Ia i Ib) była weryfikacja parametrów mechanicznych (wartości efektywnego kąta tarcia wewnętrznego  $\phi'$ ) gruntów koluwium, które określono w badaniach trójosiowych, poprzez znalezienie takich wartości, przy których obliczony współczynnik stateczności spełniał warunek  $F < 1$  (utrata stateczności). Wyjściowa wartość kąta tarcia wewnętrznego okre-

ślona w badaniach trójosiowych wynosiła  $24^\circ$ , natomiast największa wartość kąta tarcia wewnętrznego, przy której spełniony został warunek  $F < 1$ , wyniosła  $20^\circ$  i tę wartość uznano za reprezentatywną dla gruntów położonych powyżej i w strefie analizowanych w obliczeniach stateczności płaszczyzn poślizgu. Dla wariantu IIIb w obliczeniach pominięto wartość spójności gruntu ( $c'$ ) wyznaczoną dla iłolupków w badaniach trójosiowych, z uwagi na redukcję wytrzymałości w strefie przewarstwień spękanego (skruszonego) piaskowca w obrębie iłolupków (płaszczyzna poślizgu). Różnica między wartościami wyjściowymi efektywnego kąta tarcia wewnętrznego i wartością ustaloną dla warunku  $F < 1$  uwzględnia efekt skali (wielkość próbki gruntu wykorzystanej w badaniach trójosiowych w stosunku do objętości bryły gruntu analizowanej w obliczeniach stateczności) i inne błędy w szacowaniu wartości tego parametru wyznaczanego w badaniach laboratoryjnych na próbkach o nienaruszonej strukturze (NNS).

Dla precyzyjnego odtworzenia warunków powstawania osuwiska niezbędna była informacja dotycząca geometrii zbocza. Geometrię skarpy dla stanu przed wystąpieniem osuwiska określono na podstawie archiwalnych map geodezyjnych.

Geometrię skarpy dla stanu skarpy głównej po wystąpieniu ruchów masowych określono na podstawie mapy sytuacyjno-wysokościowej opracowanej na potrzeby sporządzenia dokumentacji geologiczno-inżynierskiej [Paprocki i in. 2011].

W wariantach obliczeniowych I i II poszukiwano położenia krzywej poślizgu o najniższym współczynniku stateczności, przy koncepcyjnym założeniu jej przebiegu po stropie warstwy fliszu. Dla wariantu III założono wymuszony przebieg płaszczyzny poślizgu na podstawie danych pozyskanych z analizy budowy geologicznej, opierając się na wykonanych badaniach i obserwacjach terenowych. Wyniki obliczeń współczynnika stateczności ( $F$ ) dla analizowanych wariantów obliczeniowych zestawiono w tabeli 1.

Na podstawie wykonanej analizy wstecznej zweryfikowano wartość efektywnego kąta tarcia wewnętrznego ustaloną pierwotnie na podstawie bezpośrednich testów laboratoryjnych w aparacie trójosiowego ściskania. Otrzymane wyniki obliczeń wskazują na dalsze zagrożenie stateczności skarpy osuwiska.

Wyniki przeprowadzonych obliczeń jednoznacznie wskazują, że skarpa zbocza (ukształtowana w wyniku ruchów osuwiskowych w 2010 r.) znajduje się w stanie zbliżonym do równowagi granicznej ( $F < 1,3$ ). W przypadku wystąpienia niekorzystnych zjawisk pogodowych (intensywne opady atmosferyczne) lub innych czynników gwałtownie lub stale pogarszających warunki stateczności (np. dalszy brak odprowadzenia wód opadowych z terenów powyżej skarpy osuwiska) może nastąpić kolejna utrata stateczności zarówno przy płytkim (analizowanym jako wariant koncepcyjny), jak i stwierdzonym głębszym (w części stropowej podłoża fliszowego) przebiegu powierzchni poślizgu.

## PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania geotechniczne były podstawą do numerycznego odwzorowania procesu wystąpienia osuwiska poprzez określenie położenia powierzchni poślizgu (analiza rdzeni wiertniczych) i wyznaczenie wartości parametrów wytrzymałościowych gruntów (badania laboratoryjne). Przyjęty model geotechniczny podłoża, uwzględniający ukształtowanie zbocza przed i po wystąpieniu osuwiska, umożliwił weryfikację wartości



Tabela 1. Wyniki obliczeń stateczności dla analizowanych wariantów obliczeniowych  
 Table 1. The results of stability calculations for the analysed calculation variants

Wariant obliczeniowy Calculation variant	Wartość parametrów mechanicznych Mechanical parameters values	Współczynnik stateczności, $F$ Stability factor
Wariant Ia – analiza wsteczna Ia variant – back analysis	warstwa zwierzeli/koluwium detritus layer/colluvium $\phi' = 24^\circ$	1,16
Wariant Ib – analiza wsteczna Ib variant – back analysis	warstwa zwierzeli/koluwium detritus layer/colluvium $\phi' = 20^\circ$	0,95
Wariant IIa IIa variant	warstwa zwierzeli/koluwium detritus layer/colluvium $\phi' = 20^\circ$	1,17
Wariant IIb IIb variant	warstwa zwierzeli/koluwium detritus layer/colluvium $\phi' = 20^\circ$	0,91
Wariant IIIa IIIa variant	warstwa zwierzeli/koluwium detritus layer/colluvium $\phi' = 20^\circ$ flisz – flysch $\phi' = 22^\circ, c = 19\text{kPa}$	1,97
Wariant IIIb IIIb variant	warstwa zwierzeli/koluwium detritus layer/colluvium $\phi' = 20^\circ$ flisz – flysch $\phi' = 20^\circ$	1,21

parametrów wytrzymałościowych z badań laboratoryjnych na drodze obliczeniowej. Wyznaczone z badań trójosiowych wartości kąta tarcia wewnętrznego gruntów koluwium zostały zredukowane do wartości, przy których obliczony współczynnik stateczności ( $F$ ) wskazywał na utratę stateczności zbocza ( $F < 1$ ). Taki sposób wyznaczenia wartości parametrów gruntowych redukuje błędy powstające przy ich określaniu w trakcie procedury poboru próbek gruntu i późniejszych badaniach laboratoryjnych.

W analizowanym przypadku właściwe oszacowanie wielkości parametrów mechanicznych gruntów koluwium było niezbędnym warunkiem do prognozy dalszego zachowania się zbocza oraz zaprojektowania sposobu zabezpieczenia osuwiska.

## PIŚMIENNICTWO

- Badania w aparacie trójosiowego ściskania, 2007. Procedura badawcza GEOTEKO PB-3, Warszawa.
- Burtan J., 1954. Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, arkusz Wieliczka. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- Burtan J., 1964. Szczegółowa mapa geologiczna Polski bez utworów czwartorzędowych w skali 1 : 50 000, arkusz Wieliczka. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- Chowanec J., Kolasa K., Nawrocka D., Witek K., Wykowski A., 1975. Katalog osuwisk, województwo krakowskie. Centr. Arch. Geol. Państw. Inst. Geol., Oddz. Karpacki, Kraków.

- Grabowski D. i in., 2008. Instrukcja opracowania mapy osuwisk i terenów zagrożonych ruchami masowymi. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- Paprocki P. i in., 2011. Dokumentacja geologiczno-inżynierska dla stabilizacji osuwiska zlokalizowanego w miejscowości XXXX, gm. Dobczyce, pow. myślenicki, woj. małopolskie. Geoteko Sp. z o.o., Warszawa.
- PN-EN 1997-2: 2009 Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego.
- Wójcik A., 2010. Karta rejestracyjna osuwiska. Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Kraków.
- Wysokiński L., 2011. Ocena stateczności skarp i zboczy. Zasady wyboru zabezpieczeń. Instrukcja. Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa.

### **DETERMINATION OF SOILS STRENGTH PARAMETERS USING BACK ANALYSIS FOR THE NEED OF DOCUMENTING THE DESIGN OF LANDSLIDE PROTECTION**

**Abstract.** In the second quarter of 2010, after catastrophic precipitation throughout the country (mainly in the south part), a large number of landslides were activated, what caused damages to infrastructure and buildings. This entailed the need of documenting the geotechnical conditions of landslide areas for the purposes of protection designs of the areas endangered or destroyed by landslides. Geotechnical designing process requires determination of the real values of the strength parameters of soils occurring within the main slope and colluvium of landslide. This paper describes how to determine the strength parameters based on direct testing (triaxial apparatus) verified by back analysis with using numerical stability calculation methods. The geodesic measurements (slope geometry before and during the development of the landslide) and geotechnical tests carried out within the framework of the geological-engineering documentation of the landslide within the Flysch Carpathian Mountains were the base for conducting the back analysis.

**Key words:** back analysis, landslide, stability calculations, geotechnical tests, geotechnical parameters

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 8.06.2013