

## Ocena geotechniczna stopnia aktywności osuwiska „Stok pod Baranem” w sąsiedztwie obszaru górniczego Kopalni Soli Wieliczka

Assessment of activity degree of the „Stok pod Baranem” landslide in the vicinity of the mining area of the Wieliczka Salt Mine



*Dr inż. Przemysław Baran<sup>\*)</sup>*



*Dr inż. Ewa Kozielska-Sroka<sup>\*)</sup>*



*Dr inż. Piotr Krzyk<sup>\*\*)</sup>*



*Mgr inż. Przemysław Augustyn<sup>\*\*\*)</sup>*

**Treść:** Przedmiotem artykułu jest ocena geotechniczna stopnia aktywności osuwiska „Stok pod Baranem” zlokalizowanego w rejonie obszaru górniczego Kopalni Soli Wieliczka. Obszar „Stoku pod Baranem” jest osuwiskiem skalno-zwietrzelinowym. W artykule przedstawiono wyniki badań terenowych i laboratoryjnych parametrów fizycznych i mechanicznych w powierzchniowych warstwach utworów czwartorzędowych tworzących zbocze. Pozwoliły one na wyznaczenie granicznych wartości parametrów geotechnicznych, mających wpływ na warunki stateczności stoku oraz ocenę aktywności przebiegających tam procesów denudacyjnych. Głównym powodem uruchamiania się zjawisk osuwiskowych na tym terenie jest woda opadowa, która powoduje uplastycznienie gruntów i obniżenie parametrów wytrzymałości na ścinanie. W wyniku przeprowadzonej analizy współczynnika stateczności ustalono, iż zmiana wilgotności gruntów budujących zbocze o około 5% skutkować będzie zmniejszeniem się spójności w stopniu mogącym spowodować uruchomienie procesów osuwiskowych.

**Abstract:** The aim of this paper is to assess activity degree of the “Stok pod Baranem” landslide located in the Wieliczka Salt Mine mining region. The investigated area is a rock-saprolitic landslide. Results of field and laboratory tests of physical and mechanical properties of subsurface landslide quaternary soils have been presented in this paper. The results allowed to estimate the limit values of geotechnical properties as well as the activity of denudation processes. The main reason for sliding activities in this region is a rainfall which that causes plasticity and reduction of shear strength parameters in soils. On the basis of the analysis of stability factor, it was found that the increase in moisture content of soils building the slope by about 5% will result in a decrease in cohesion, big enough to cause the landslide processes.

<sup>\*)</sup> Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie. <sup>\*\*)</sup> Instytut Rozwoju Miast w Krakowie <sup>\*\*\*)</sup> Roha Group Sp. z o.o. oddział Kraków

**Słowa kluczowe:***stateczność zboczy, osuwisko, analiza MES***Key words:***slope stability, landslide, FEM analysis***1. Wprowadzenie**

Większość osuwisk na terenie Polski występuje w rejonie Karpat, gdzie na stosunkowo niewielkim obszarze (zaledwie 6% powierzchni kraju), osuwiska i inne formy powierzchniowych ruchów masowych zajmują nawet 30-40% powierzchni terenu [2]. Czynniki wpływające na powstawanie osuwisk można podzielić na aktywne i pasywne. Do grupy czynników pasywnych zaliczyć należy: litologię i tektonikę, a także rzeźbę stoków; do czynników aktywnych: warunki klimatyczne, hydrologiczne, antropogeniczne, oraz ruchy tektoniczne. W karpackiej części województwa małopolskiego (obszarze, w którym zlokalizowano obiekt badawczy) występowaniu osuwisk sprzyja obecność w podłożu utworów fliszowych z dużym udziałem skał łupkowych i łupkowo-piaskowcowych [5]. Flisz karpacki, którego specyfiką jest naprzemianległe ułożenie piaskowców i łupków ilastych, co w przypadku upadu warstw zgodnie z linią spadku zbocza jest główną przyczyną tworzenia się osuwisk.

Najczęstszymi przyczynami powstawania osuwisk bez udziału wody jest zgodny upad warstw gruntu lub kierunek spękań skał z kierunkiem nachylenia zbocza, podkopanie zbocza, występowanie wygładzonych powierzchni poślizgu na obszarach starych osuwisk. Niemały wpływ na stateczność zboczy mają dodatkowe siły obciążające w postaci zabudowy. Nie tylko obiekty zlokalizowane bezpośrednio na zboczu mogą być groźne, ale także te nad zboczem. Pozostałe przyczyny to wietrzenie skał, osłabiające ich strukturę, wstrząsy i wibracje spowodowane trzęsieniami ziemi, ale także te bardziej powszechne, spowodowane ruchem drogowym. Mróz także może zmniejszyć parametry wytrzymałościowe gruntu. Cykliczne przemarzanie i odmarzanie niszczy strukturę gleby.

Zdecydowanie groźniejsze, bo szybciej uruchamiające osuwisko, są przyczyny związane z zawilgoceniem gruntu. Zaliczamy do nich wypełnienie wodą szczelin lub spękania ponad zboczem, napór wody od dołu na górne warstwy mało przepuszczalne, pęcznienie gruntu wynikające z nasycenia go wodą pochodzącą z opadów lub topniejącego śniegu, wymywanie drobnych frakcji gruntu poprzez infiltrującą wodę, a także powstające ciśnienie sphywowe i wypór wody w masie gruntowej zbocza spowodowane gwałtownym obniżeniem poziomu wód powierzchniowych. Największe ryzyko powstania osuwiska występuje przy kumulacji kilku wymienionych czynników.

W artykule przedstawiono wyniki badań na obszarze osuwiskowym „Stok pod Baranem” zlokalizowanym w Wieliczce. Celem tych badań było określenie właściwości geotechnicznych gruntów budujących przedmiotowe zbocze oraz ocena jego stateczności w oparciu o uzyskane wartości parametrów fizycznych i mechanicznych. W ramach badań terenowych przeprowadzono wizję lokalną wraz z wykonaniem pięciu odkrywek badawczych, z pobraniem materiału celem ustalenia gęstości objętościowej. Na podstawie pomiaru, określono także, poziom zalegania zwierciadła wód gruntowych. W ramach prac laboratoryjnych wyznaczono: wilgotność naturalną, skład granulometryczny, granice konsystencji gruntu, maksymalną gęstość objętościową i wilgotność optymalną, parametry wytrzymałości na ścinanie. Dla określenia warunków stateczności zbocza w badanym przekroju, przeprowadzono

obliczenia współczynnika stateczności metodą elementów skończonych (MES).

**2. Charakterystyka ruchów masowych w rejonie Wieliczki**

Gmina i miasto Wieliczka położona jest na terenie Kotliny Sandomierskiej i Karpat. Na terenie miasta i gminy Wieliczka zarejestrowano 324 osuwiska [8]. Najwięcej obszarów osuwiskowych jest na terenie między Gólkowicami a Chorągwicą. Obszar gminy i miasta Wieliczki jest zróżnicowany pod względem charakteru, typu, jak i wielkości osuwisk. Podstawą do wydzielenia poszczególnych osuwisk jest zachowanie charakterystycznych form nisz, a zwłaszcza skarp osuwiskowych oraz jezorów koluwalnych. W obrębie Wieliczki występują prawie wyłącznie zsuwy powstałe w wyniku przemieszczenia gruntów i skał wzdłuż powierzchni ścicia, wykazujące duży związek z budową podłoża. Warunkiem powstania osuwisk jest współwystępowanie utworów osuwiskotwórczych odpowiednio zawodnionych oraz określonego nachylenia powierzchni [8]. Najczęstszym procesem jest tutaj zsuwanie się mas skalnych i pokryw wzdłuż powierzchni strukturalnych. Terenów zagrożonych występowaniem osuwisk w rejonie Wieliczki jest stosunkowo dużo. Są to obszary, gdzie prawdopodobnie istniały stare osuwiska, lecz w wyniku różnych procesów geologicznych ślady osuwania zostały zatarte. Na terenie Wieliczki można wyróżnić osuwiska: aktywne (z wyraźnymi szczelinami i spękaniami gruntu, wybrzuszeniami terenu), okresowo-aktywne (objęte procesami osuwiskowymi, na których stwierdzono niedawne zsunęcia i przemieszczenia gruntu) i nieaktywne (na których w czasie ostatnich 20 lat nie stwierdzono wyraźnych przemieszczeń materiału gruntowego).

**3. Charakterystyka badanego obszaru osuwiskowego**

Obszar badanego osuwiska „Stok pod Baranem” ma długość około 550 m, szerokość od 200 do 350 m. Wznosi się od 260 do 350 m n.p.m. Kąt nachylenia zbocza wynosi około 30° (miejscami dochodzi nawet do 60°). Procesy osuwiskowe rozwijają się na badanym terenie od końca plejstocenu i trwają do dzisiaj. Ich rozmiar i dynamika uwarunkowane są klimatem, opadami, roślinnością oraz działalnością człowieka. Zarys obszaru osuwiskowego wraz z zaznaczeniem obszaru badań przedstawiono na rys. 1. W tej części zbocza, w latach 1985-1987, zaobserwowano różną aktywność osuwiskową [6].

Obszar „Stoku pod Baranem” jest osuwiskiem skalno-zwietrzelinowym, zlokalizowanym w obszarze górniczym Kopalni Soli Wieliczka. Stok nie jest objęty typowymi uszkodzeniami dla rejonu Wieliczki (szczeliny, zapadliska itp.). W dolnej części znajduje się stary staw „Syberia”, zbierający wody opadowe z całego stoku oraz okresowego cieku przebiegającego zachodnią jego granicą. Woda ze stawu odprowadzana jest regulowanym odpływem i stanowi początek Serafy – głównego cieku odwadniającego kotlinę Wieliczki [7]. Obecnie działalność kopalni soli nie jest jednak bez znaczenia, pomimo zaprzestania intensywnej eksploatacji złoża. Badania wykonane przez kopalnię [3] wykazały osiadanie terenu stoku w rejonie stawu „Syberia” (północna część obszaru badań) w granicach 8 mm rocznie. Prognoza na przy-



Rys. 1. Mapa aktywności osuwiskowej „Stok pod Baranem”  
 Fig. 1. Landslide activity map of “Stok pod Baranem”

szłe lata określa, że osiadanie powinno utrzymać się na tym poziomie. Innego wpływu ze strony kopalni nie przewiduje się. Omawiany teren jest nieużytkiem. Pokrywają go krzewy i roślinność łąkowa. W przeszłości miał tam powstać stok narciarski wraz z infrastrukturą, lecz ze względu na warunki geologiczne zrezygnowano z inwestycji.

#### 4. Budowa geologiczna

Zbocze budują osady fliszu karpackiego: dolnokredowe łupki i piaskowce serii śląskiej i podśląskiej. Utwory te są tektonicznie bardzo zaburzone. Ogólnie na stoku zdecydowanie przeważają łupki i łupki margliste w górnej części stoku z przewarstwieniami piaskowca, nietworzące jednorodnych kompleksów. Upad warstw skalnych wynosi od kilku do  $50^\circ - 68^\circ$ . Na skutek procesów wietrzeniowych, częściowo również tektonicznych, pierwotne utwory fliszowe grupy łupkowej uległy rozluźnieniu i przekształciły się w mieszaninę ilasto-łupkową z cienkimi wkładkami piaskowca [7]. W północnym rejonie występuje granica nasunięcia utworów fliszowych na utwory miocenu. Skalne podłoże przykrywają osady czwartorzędowe o miąższości od 1 m w najwyższej części terenu do 6 - 7,5 m w części środkowej i dolnej. Osady czwartorzędowe są pochodzenia eolicznego – pyły i gliny pylaste lessowate oraz wodnolodowcowe gliny i piaski. Procesy denudacyjne,

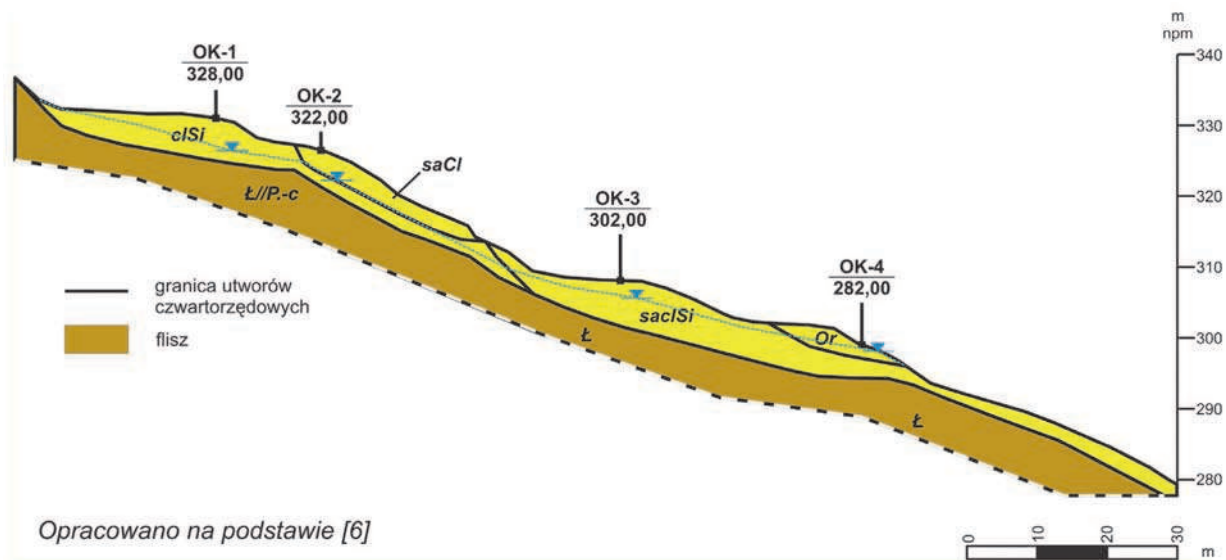
które zachodzą na stoku, uwarunkowane są zróżnicowaniem podłoża skalnego i występują na granicy nadkładu czwartorzędowego i utworów fliszowych.

Wykorzystując archiwalne przekroje geologiczne [6], uzupełnione o wyniki własnych badań terenowych z czterech odkrywek (OK-1÷OK-4), opracowano docelowy przekrój geologiczno-inżynierski (rys. 2), na którym zaznaczono rodzaje gruntów występujących na zboczu, zwierciadło wody gruntowej, a także granicę utworów czwartorzędowych i początek zalegania fliszu.

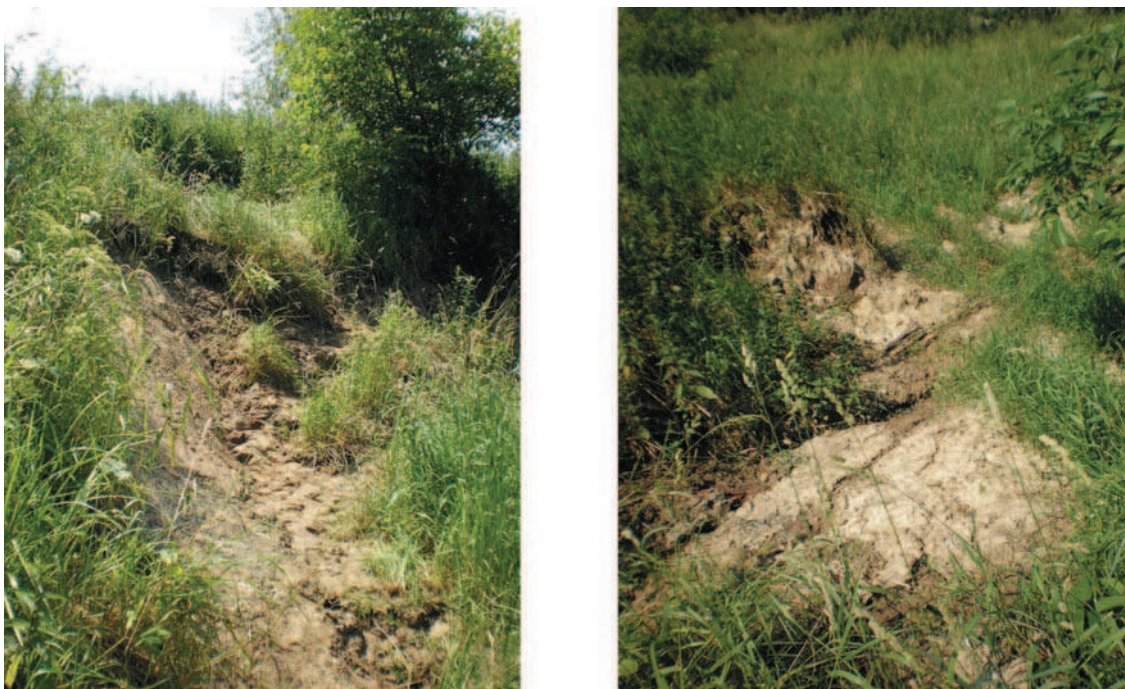
#### 5. Wyniki badań geotechnicznych

W ramach badań geotechnicznych wykonano cztery odkrywki o głębokości od 0,6 do 1,0 m, z których pobrano próby (z dwóch różniących się głębokością poziomów odkrywki) do oznaczeń parametrów fizycznych i mechanicznych. Badania były utrudnione przez bujną roślinność. Pomimo bogatej szaty roślinnej procesy osuwiskowe były jednak wyraźnie widoczne (rys. 3).

Wyniki analizy składu granulometrycznego, pobranych gruntów z odkrywek przedstawiono w tabl. 1 (są to średnie wartości z badanych poziomów), z analizy których wynika, że badany obszar osuwiska tworzą grunty ilaste (OK-2), pylaste (OK-3, OK-1) i organiczne (OK-4).



Rys. 2. Przekrój geologiczno-inżynierski w badanym obszarze „Stoku pod Baranem”  
 Fig. 2. Geo-engineering cross-section in the analyzed area of “Stok pod Baranem”



Rys. 3. Fragmenty zmian osuwiskowych w rejonie odkrywki OK-2  
 Fig. 3. Portions of landslide changes in the vicinity of OK-2 probe

Tablica 1. Wyniki badania składu granulometrycznego i zawartości części organicznych  
 Table 1. Research results of grain size composition and organic content

Nr odkrywki	Zawartość frakcji wg PN-EN ISO, %			Rodzaj gruntu wg		I <sub>OM</sub> , %
	Sa	Si	Cl	PN-EN ISO	PN	
OK-1	12	78	15	clSi	G <sub>II</sub>	3,84
OK-2	9	54	26	saCl	G <sub>III</sub>	3,28
OK-3	17	67	16	sacI Si	G <sub>II</sub>	5,69
OK-4	10	63	27	Or	N	11,58

gdzie: I<sub>OM</sub> – zawartość części organicznych.  
 where: I<sub>OM</sub> – organic particles content

**Tablica 2. Zestawienie wyników obliczeń gęstości, wilgotności i wskaźnika zagęszczenia**  
**Table 2. Summary of the results of density, moisture content and compaction index calculation**

Rodzaj gruntu	$\rho$	$w_n$	$w_{opt}$	$\rho_{ds}$	$\rho_d$	$I_s$
	$g \cdot cm^{-3}$	%	%	$g \cdot cm^{-3}$	$g \cdot cm^{-3}$	[-]
saclSi	1,75	30,82	16,50	1,61	1,32	0,82
Or	1,23	51,41	33,97	1,22	0,81	0,66
saCl	1,70	22,30	17,38	1,71	1,37	0,80
clSi	2,00	18,11	17,59	1,63	1,69	1,04

gdzie:  $\rho$  – gęstość objętościowa,  $\rho_{ds}$  – maksymalna gęstość objętościowa szkieletu,  $\rho_d$  – gęstość objętościowa szkieletu,  $w_n$  – wilgotność naturalna,  $w_{opt}$  – wilgotność optymalna,  $I_s$  – wskaźnik zagęszczenia.  
 where:  $\rho$  – volume density,  $\rho_{ds}$  – maximum dry density of solid particles,  $\rho_d$  – dry density of solid particles,  $w_n$  – natural moisture content,  $w_{opt}$  – optimal moisture content,  $I_s$  – degree of compaction

**Tablica 3. Zestawienie wyników badań granic konsystencji**  
**Table 3. Summary of the research results of consistency limits**

Rodzaj gruntu	$w_L$	$w_p$	$I_p$	$I_c$	Stan gruntu wg ISO
	%	%	%	[-]	
saclSi	40,50	26,02	14,48	0,67	Plastyczny
Or	37,80	36,00	1,80	-7,56	Płynny
saCl	45,06	21,10	23,96	0,95	Twardo plastyczny
clSi	23,98	18,47	5,42	1,08	Zwarty

gdzie:  $w_L$  – granica płynności,  $w_p$  – granica plastyczności,  $I_p$  – wskaźnik plastyczności,  $I_c$  – wskaźnik konsystencji  
 where:  $w_L$  – flow limit,  $w_p$  – yield point,  $I_p$  – plasticity index,  $I_c$  – consistency index

Wyniki badań terenowych zamieszczone w tabl. 2 wskazują na duże zróżnicowanie wilgotności od 18÷51% (wartość wyższą stwierdzono w dolnej części stoku) oraz bardzo słabe zagęszczenie zbocza. Wartości wskaźników zagęszczenia  $I_s$  mieszczą się w przedziale od 0,66 – 0,80, przy czym wyższą wartość stwierdzono w górnej części stoku.

Przedstawione w tabl. 3 wyniki badań granic konsystencji gruntów, ich wskaźników i stopni plastyczności wskazują, że w rejonie odkrywek zlokalizowanych bliżej podstawy zbocza grunt był odpowiednio w stanie plastycznym i płynnym, natomiast w pozostałych odkrywkach był w stanie twardoplastycznym i półzwartym.

W celu możliwie dokładnego określenia warunków stateczności badanego stoku, wykonano oznaczenia parametrów wytrzymałości na ścinanie za pomocą standardowego aparatu skrzynkowego o wymiarach skrzynki 60x60 mm. Każdy grunt był poddany takim samym obciążeniom pionowym wynoszącym: 25, 50, 75, 100, 150 kPa. Prędkość ścinania wynosiła 0,1 mm·min<sup>-1</sup>. Badanie było prowadzone do czasu,

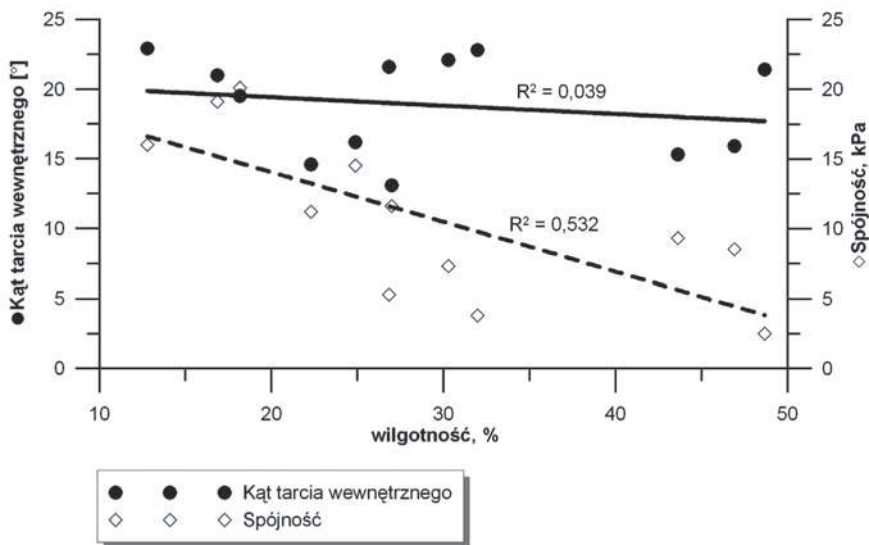
gdy próba została odkształcona o wartość większą niż 10% poziomego wymiaru skrzynki, który ze względu na maksymalną średnicę ziaren w badanych gruntach, nieprzekraczającą 4 mm, wynosił 6 mm. Ścinanie przeprowadzono w różnych warunkach wilgotnościowych, tj.: przy wilgotności naturalnej, po nawadnianiu prób wodą przez 24 godziny oraz przy wilgotności mniejszej od naturalnej o około 5%. Te ostatnie warunki podyktowane zostały okresem, w którym pobrano próbki do badania (tuż po obfitych opadach atmosferycznych). Dlatego zmniejszono wilgotność naturalną tak, aby zbadać kierunek i wielkość zmian parametrów wytrzymałości na ścinanie, w sytuacji osuszenia gruntów zalegających na badanym stoku. Wyniki badań zestawiono w tablicy 4.

Wynika z niej, że wartości kąta tarcia wewnętrznego mieściły się w zakresie 13-23°, przy czym wartość tego parametru nie zależała wyraźnie od wilgotności, czego dowodem jest niski współczynnik determinacji  $R^2$  (rys. 4). W przypadku gruntu oznaczonego jako Or i saCl obserwuje się nawet pewien wzrost kąta tarcia wraz ze wzrostem nawodnienia próby.

**Tablica 4. Zestawienie wyników badań parametrów wytrzymałościowych gruntów**  
**Table 4. Summary of the research results of the soil strength parameters**

Rodzaj gruntu	Warunki badania	$w$	$\phi$	$c$
		%	[°]	kPa
saclSi	A	24,88	16,2	14,5
	B	30,29	22,1	7,3
	C	31,98	22,8	3,8
Or	A	43,62	15,3	9,3
	B	46,92	15,9	8,5
	C	48,66	21,4	2,5
saCl	A	18,17	19,5	20,1
	B	22,30	14,6	11,2
	C	26,99	13,1	11,6
clSi	A	12,79	22,9	16,0
	B	16,85	21,0	19,1
	C	26,85	21,6	5,3

gdzie: A – badanie przy wilgotności mniejszej od naturalnej o około 5%, B – przy wilgotności naturalnej, C – po nawadnianiu prób wodą przez 24 godziny,  $\phi$  – kąt tarcia wewnętrznego,  $c$  – spójność  
 where: A – test for moisture content lower than the natural one by about 5%, B – b. for natural moisture, C – b. after irrigation of the samples for 24 hours,  $\phi$  – angle of internal friction,  $c$  – cohesion



Rys. 4. Zależność kąta tarcia wewnętrznego i spójności od wilgotności badanych gruntów

Fig. 4. Relation between the angle of internal friction and cohesion, and the moisture content in the analyzed soils

W przypadku spójności, wartość jej kształtowała się w dużo szerszym przedziale 2-20 kPa; zaobserwować można tendencję spadkową tego parametru wraz ze wzrostem wilgotności. Widać tutaj silniejszą zależność spójności od wilgotności, co przełożyło się na dużo wyższy współczynnik  $R^2$  (rys. 4). Praktycznie oznacza to, iż przy znacznym zawilgoceniu występujących w zboczu gruntów, kohezja praktycznie zanika, co w dużym stopniu obniża wytrzymałość gruntu na ścinanie i jest główną przyczyną uruchamiającą procesy osuwiskowe.

6. Analiza warunków stateczności zbocza

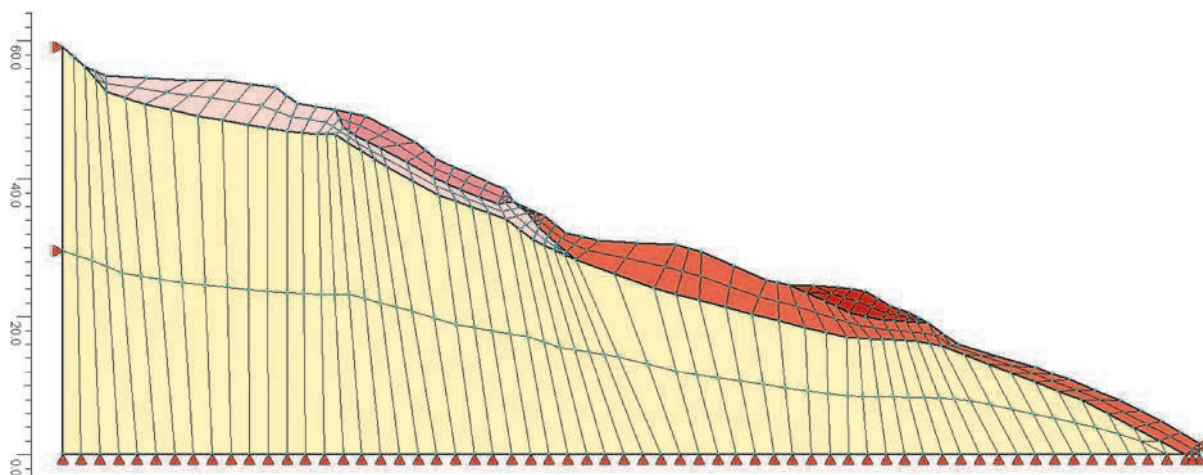
Osuwiska powstają w wyniku zaburzenia równowagi między naprężeniami ścinającymi a oporem gruntu na ścinanie. Utratę stateczności powodują więc dodatkowe siły lub zanik istniejących (tarcia). Do obliczeń stateczności przedmiotowego zbocza wykorzystano metodę redukcji parametrów wytrzymałościowych (opisaną między innymi w [1]), sprzężoną

z systemem obliczeniowym, bazującym na metodzie elementów skończonych Z\_Soil.PC [10]. Jako model gruntu (utworów czwartorzędowych) przyjęto model sprężysto idealnie plastyczny Druckera-Pragera. Utwory fliszowe zamodelowane zostały jako sprężyste. Zdyskretyzowany siatką elementów skończonych obszar analizy przedstawiono poniżej (rys. 5).

Obliczenia zostały przeprowadzone dla warunków wilgotnościowych takich samych, jak w przypadku badań wytrzymałości na ścinanie. W wyniku przeprowadzonych obliczeń ustalono współczynnik stateczności zbocza  $F$ , którego wartość w zależności od wilgotności materiału gruntowego budującego zbocze przedstawiała się następująco:

- $F=1,48$  dla wilgotności gruntów mniejszej o 5% od naturalnej,
- $F=1,35$  dla naturalnej wilgotności gruntów,
- $F=0,86$  dla wilgotności gruntów po nawodnieniu przez 24h.

Zakładając prawdopodobieństwo wystąpienia osuwiska przyjęte zgodnie z instrukcją ITB [9] (tabl. 5) można



Rys. 5 Siatka MES przyjęta do obliczeń

Fig. 5. FEM mesh adopted for calculations

**Tablica 5. Warunek wystąpienia osuwiska zgodnie z instrukcją ITB [9]**  
**Table 5. Condition of landslides occurrence according to the instruction of ITB [9]**

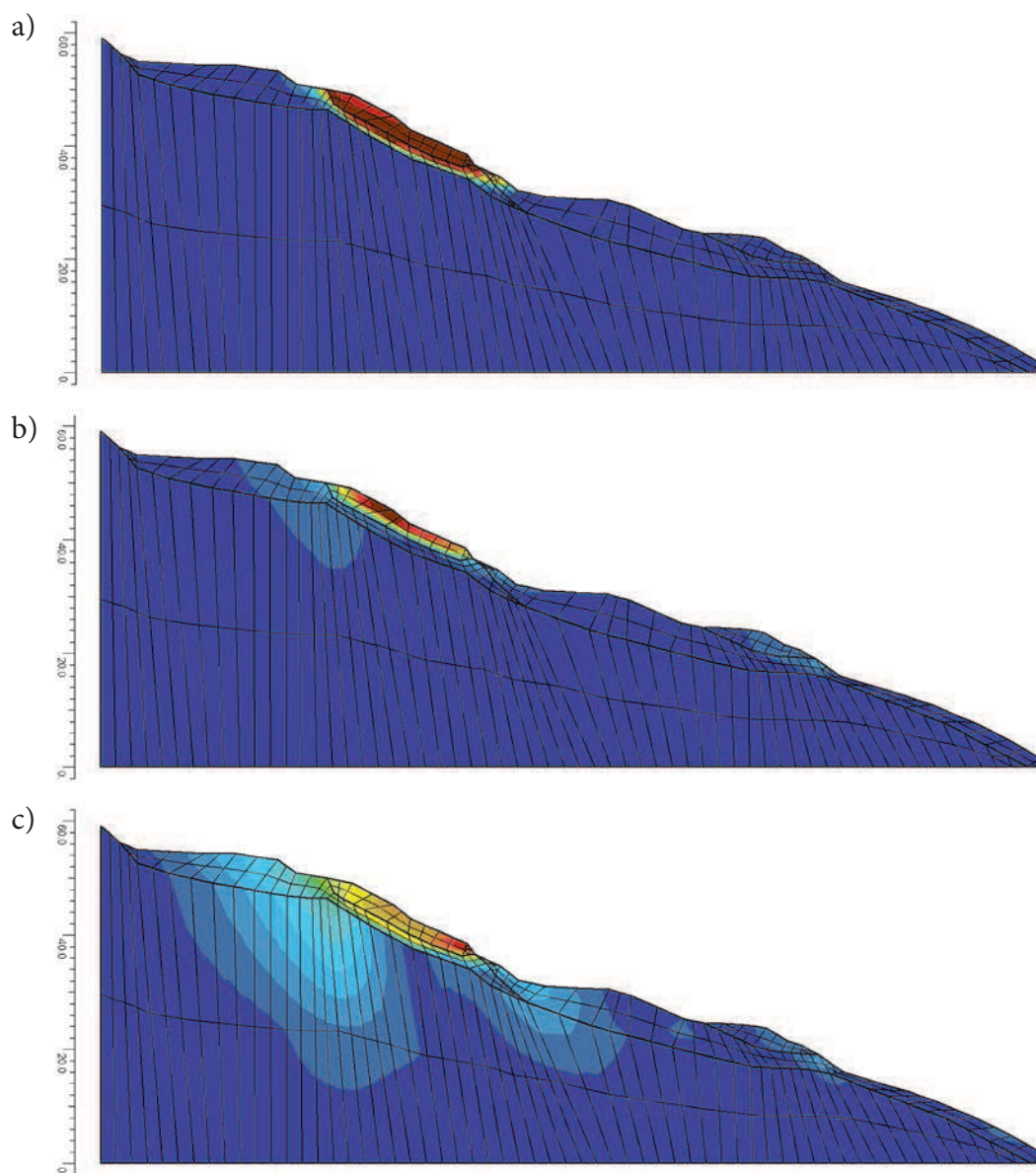
Prawdopodobieństwo wystąpienia osuwiska	Współczynnik stateczności $F$
bardzo mało prawdopodobne	$> 1,5$
mało prawdopodobne	1,3 - 1,5
prawdopodobne	1,0 - 1,3
bardzo prawdopodobne	$< 1,0$

wnioskować, iż przy wilgotności gruntu naturalnej i poniżej naturalnej, wystąpienie ruchów osuwiskowych jest mało prawdopodobne. W przypadku gruntu nawodnionego wzrasta do bardzo prawdopodobnego, co uzyskało potwierdzenie podczas wizji terenowej.

Analiza stateczności wykazała również, iż w każdej z konfiguracji parametrów wytrzymałościowych, ustalonych w danych warunkach wilgotnościowych, największa koncen-

tracja przemieszczeń uzyskanych algorytmem „ $c-\phi$  redukcji”, jest zlokalizowana w górnej części badanego zbocza (rys. 6). Niniejsze stwierdzenie również znalazło potwierdzenie podczas wizji terenowej, gdzie najbardziej widoczne części osuniętego koluwium wystąpiły właśnie w górnych partiach zbocza.

Badania wykazały wyraźną zależność współczynnika stateczności od spójności, a tym samym od przyrostu wilgot-



**Rys. 6. Mapy przemieszczeń uzyskane metodą redukcji parametrów wytrzymałościowych gruntu**  
 a) dla wilgotności ok. 5% mniejszej od naturalnej, b) dla wilgotności naturalnej, c) dla wilgotności uzyskanej po 24h nawadniania prób

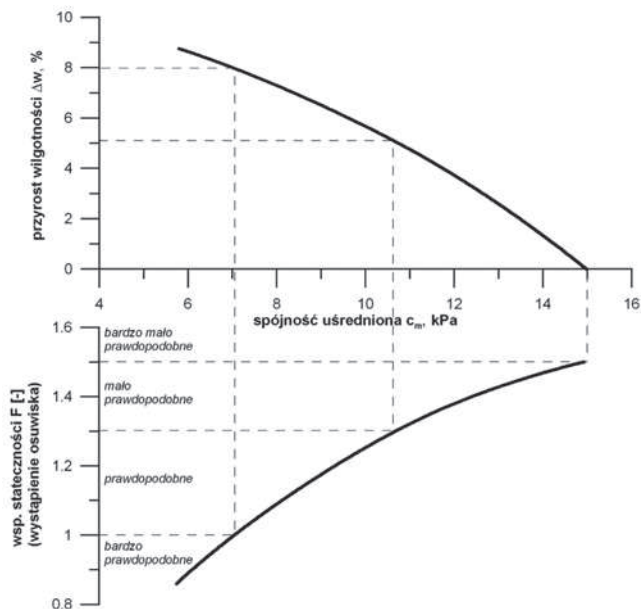
**Fig. 6. Displacement maps obtained by the strength parameters reduction method**

ności. Uśredniając wartość wilgotności i spójności w obrębie badanych gruntów, możliwe było zestawienie ich względem uzyskanego z MES współczynnika stateczności – zależności te przedstawiono na rys. 7. Na ich podstawie możliwe jest ustalenie, jak na stateczność zbocza (lub prawdopodobieństwo wystąpienia osuwiska) wpłynie zmiana wilgotności gruntów budujących stok. Analizując wykres, możliwe jest stwierdzenie, iż zmiana wilgotności o 5% skutkować będzie zmniejszeniem się spójności w stopniu mogącym spowodować uruchomienie procesów osuwiskowych.

## 7. Podsumowanie i wnioski

Proces oceny stateczności zboczy wymaga stosowania wielu założeń upraszczających, których wpływ jest złożony i zależny od budowy geologicznej badanego obszaru. Im bardziej skomplikowana jest budowa geologiczna, tym więcej istnieje czynników istotnie wpływających na stateczność, które powinny być w miarę możliwości uwzględnione w analizie [4]. Z drugiej strony, w każdej analizie wykorzystującej modele obliczeniowe tak uproszczone, jak i złożone, istnieje potrzeba pozyskania odpowiednich parametrów geotechnicznych. Zatem, w przypadku analizy stateczności zboczy konieczne są badania zarówno terenowe, jak i laboratoryjne, a uzyskane tą drogą parametry materiału gruntowego powinny w możliwie najlepszy sposób opisywać warunki wyjściowe, na podstawie których interpretowane będą wyniki dalszych obliczeń. Na podstawie przeprowadzonych obserwacji terenowych, badań laboratoryjnych i wykonanych obliczeń stateczności przedmiotowego zbocza, wysunięto poniższe wnioski.

„Stok pod Baranem”, zlokalizowany w gminie Wieliczka, jest osuwiskiem skalno-zwietrzelinowym, w znacznej części położonym na obszarze górniczym Kopalni Soli Wieliczka.



Rys. 7. Zależność współczynnika stateczności od wilgotności i spójności

Fig. 7. Relation of the stability coefficient and the moisture content and cohesion

Przyczyną występowania na badanym zboczu procesów denudacyjnych jest zaleganie utworów pylasto-ilastych i organicznych (w dolnej części stoku) na zwietrzałych, podatnych na lustrzenie i wytwarzanie powierzchni poślizgu łupkach ilastych.

Przedmiotowy stok jest słabo zagęszczony i budują go grunty o silnych właściwościach chłonięcia wody, stąd głównym motorem uruchamiania się zjawisk osuwiskowych na tym terenie jest woda opadowa, która powoduje uplastycznienie gruntów i obniżenie wartości spójności.

Na całym obszarze „Stoku pod Baranem” można zaobserwować liczne wybrzuszenia terenu, jak i obsuwy gruntu. Najczęściej można się z nimi spotkać w górnej części stoku. W niższych partiach, gdzie nachylenie łagodniejsze, nie zaobserwowano podobnych deformacji.

Przeprowadzone obliczenia stateczności wykazały, że dla gruntów nawodnionych uzyskana wartość współczynnika stateczności jest poniżej wartości granicznej 1,0. Zjawiska osuwiskowe, które występowały na zboczu w przeszłości były spowodowane gwałtownymi i długotrwałymi opadami deszczu, stąd należy spodziewać się, iż w przypadku powtórzenia tak niekorzystnych warunków, może nastąpić uaktywnienie się procesów morfogenetycznych i starych osuwisk oraz tworzenie się nowych w obrębie stoku.

Najbardziej narażona na osunięcie się jest górna część stoku, w której poślizg występuje na kontakcie warstw pylastych z ilastymi. Grunty pylaste budujące zbocze w tej części stoku charakteryzują się niskim wskaźnikiem plastyczności, co powoduje, że przy niewielkim wzroście wilgotności bardzo łatwo się upłynniają.

## Literatura

1. Baran P., Cholewa M., Zawisza E., Kulasik K.: Problem jednoznacznego ustalenia parametrów wytrzymałości na ścinanie odpadów powęglowych i poenergetycznych. Rocznik „Ochrona Środowiska” 2013, t. 15.
2. Bober L.: Rejony osuwiskowe w polskich Karpatach fliszowych i ich związek z budową geologiczną. Biuletyn Instytutu Geologicznego 1984. 340, Z badań geologicznych w Karpatach, t. XXIII (115-153).
3. Brudnik K., Stawarczyk Z.: Opinia o warunkach geologiczno-górnictwowych nr 7/2004. Kopalnia Soli Wieliczka 2004 (maszynopis).
4. Cala M., Betlej M.: Wybrane aspekty trójwymiarowego modelowania numerycznego stateczności zboczy w warunkach skomplikowanej budowy geologicznej. „Przeгляд Górnictwa” 2010, nr 6.
5. Chowaniec J., Wójcik A., Mrozek T., Rączkowski W., Nescieruk P., Perski Z., Wojciechowski T., Marciniak P., Zimnal Z., Granaszewski W.: Osuwiska w województwie małopolskim. Atlas - przewodnik. Praca zbiorowa pod redakcją J. Chowańca i A. Wójcika. Departament Środowiska, Rolnictwa i Geodezji Urzędu Marszałkowskiego Województwa Małopolskiego, Zespół Geologii 2012.
6. Gargula G., Orłowski J.: Kompleksowa dokumentacja geologiczna rejonów osuwiskowych w Wieliczce. Część IV – Rejon osuwiskowy V „Wieliczka”, obiekt CH-2435. Przedsiębiorstwo Geologiczne w Krakowie. Kraków 1989 (maszynopis).
7. Jastrzębski J.: Opinia geologiczno-inżynierska do planu zagospodarowania terenu stacji narciarskiej „Stok pod Baranem” w Wieliczce. Wieliczka 2007 (maszynopis).
8. Wójcik A., Dacka J.: Rejestracja osuwisk i terenów zagrożonych na terenie miasta i gminy Wieliczka w skali 1:10 000 wraz z wykazaniem ich stopnia aktywności. PiG, Kraków 2008 (maszynopis).
9. Wysokiński L.: Posadowienie obiektów budowlanych w sąsiedztwie skarp i zboczy. Instrukcja ITB nr 304, Warszawa 1991.
10. Z\_SOIL.PC, Theoretical Manual. ZACE Services Ltd. Lozanna 1998.