

Marek Ciał\*, Michał Kowalski\*, Michał Betlej\*

## ANALIZA PRZEBIEGU PROCESÓW OSUWISKOWYCH W OPARCIU O PROCEDURĘ „AUTOMATIC REZONING” W PROGRAMIE FLAC V. 6.0

---

### 1. Wprowadzenie

Klasyczna analiza stateczności skarp ogranicza się do określenia wskaźnika stateczności oraz potencjalnej powierzchni poślizgu bryły osuwiskowej, nie mówi natomiast nic o samym przebiegu osuwiska ani o ostatecznej geometrii ustabilizowanego osuwiska. Numeryczna analiza procesu osuwiskowego jest zagadnieniem o znacznym stopniu skomplikowania. Aby przeanalizować przebieg deformacji skarpy należy przeprowadzić obliczenia w trybie dużych odkształceń, co pociąga za sobą znaczne deformacje siatki, uniemożliwiające po pewnym czasie kontynuowanie obliczeń, ze względu na złą geometrię stref. Przydatna może być w tym przypadku wprowadzona w wersji 6.0 programu FLAC procedura *automatic rezoning* [1].

### 2. Opis procedury *automatic rezoning*

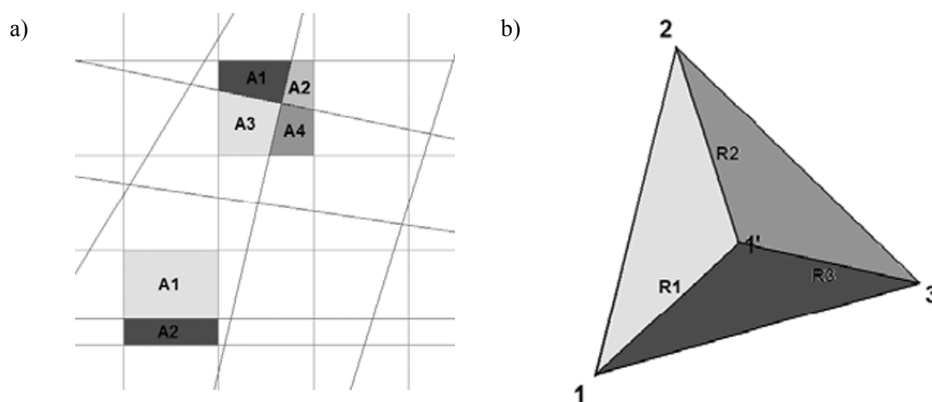
W przypadku gdy obliczenia w programie FLAC przeprowadzane są w trybie dużych odkształceń, może dojść do tak znacznego zniekształcenia siatki, że dalsze obliczenia są niemożliwe wskutek wystąpienia błędu *bad geometry*. Aby uniknąć powyższego błędu można zastosować dostępną od wersji 6.0 procedurę *automatic rezoning*, która odwzorowuje istniejące naprężenia, prędkości, przemieszczenia oraz inne wielkości na nową, bardziej dostosowaną do zaistniałych przemieszczeń, umożliwiając kontynuowanie obliczeń. Ponieważ w procesie odwzorowania stosuje się interpolację, pewna utrata dokładności obliczeń jest nieunikniona. Aby zminimalizować te efekty, naprężenia są odwzorowywane dla każdej podstrefy oddzielnie.

---

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

Kiedy zostaje wywołane polecenie REZONE występują poniższe akcje:

- 1) Zmienne modelu zapisywane są w tymczasowej pamięci. Zapis obejmuje naprężenie w podstrefach, prędkości i przemieszczenia węzłów, właściwości materiałowe, właściwości cieczy i ciśnienia porowe (jeżeli występują), temperatury i właściwości termiczne (jeżeli występują), a także inne zmienne, jak np. aktualne warunki brzegowe.
- 2) Zostaje wywołana (zdefiniowana przez użytkownika) funkcja w języku FISH (wewnętrzny język w programie FLAC). Zadaniem tej funkcji jest wygenerowanie nowej siatki.
- 3) Naprężenia, prędkości i przemieszczenia są mapowane ze starej na nową siatkę. Zmienne strefowe (np. składowe naprężenia) są odwzorowywane bazując na nakładających się na siebie fragmentach starej i nowej siatki w danej strefie. Dla zmiennych węzłowych, takich jak prędkości i przemieszczenia, nowe zmienne są interpolowane z trójkątnej podstrefy, wewnątrz której jest zlokalizowany punkt węzłowy. Współczynniki wagowe są określone poprzez odległość od każdego z węzłów podstrefy (rys. 1). Taki schemat interpolacji spełnia warunki równowagi sił i momentów.
- 4) Właściwości materiałowe są odwzorowywane podobnie jak składowe naprężenia, z tą różnicą, że właściwości materiałowe są odwzorowywane używając całych pełnych stref zamiast podstref.
- 5) Obliczenia są kontynuowane na nowej siatce, aż do ponownego wystąpienia błędu *bad geometry* i powrotu do punktu 1 lub osiągnięcia stanu równowagi modelu.

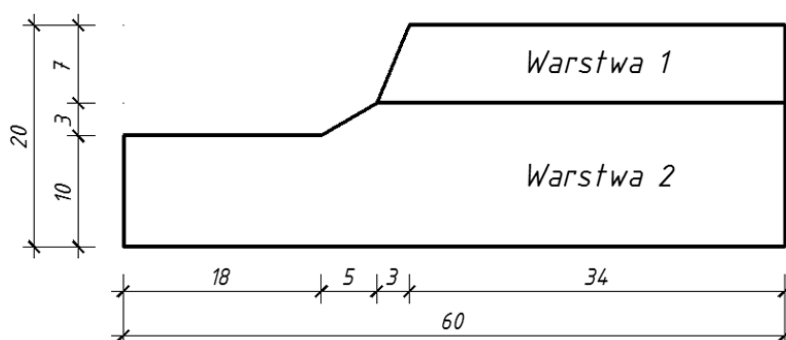


Rys. 1. Odwzorowanie zmiennych: a) strefowych; b) węzłowych

### 3. Przykłady zastosowania funkcji *automatic rezoning* do analizy utraty stateczności zbocza o prostej geometrii

W celu przedstawienia zasady działania wspomnianej funkcji wykonano analizę utraty stateczności zbocza złożonego z dwóch różnych materiałów w dwóch wariantach (rys. 2).

W wariantcie pierwszym warstwa gruntu o wyższych właściwościach wytrzymałościowych i odkształceniowych (zwana dalej mocniejszą) znajduje się na warstwie o niższych właściwościach wytrzymałościowych i odkształceniowych (zwanej dalej słabszą), natomiast w wariantcie drugim warstwa słabsza znajduje się na warstwie mocniejszej. Właściwości materiałów dla obydwu wariantów zestawiono w tabeli 1.



Rys. 2. Geometria modelu przyjętego do obliczeń

TABELA 1

Parametry mechaniczne warstw gruntu

	Wariant 1		Wariant 2	
	Warstwa 1	Warstwa 2	Warstwa 1	Warstwa 2
Gęstość objętościowa $\rho_d$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2500	1500	2500	1500
Kąt tarcia wewnętrznego $\phi$ [°]	45	10	8	30
Kohezja $c$ [kPa]	50	5	8	30
Wytrzymałość na rozciąganie $t$ [kPa]	50	5	8	30
Kąt dylatacji $\psi$ [°]	0			
Moduł sprężystości podłużnej $E$ [MPa]	50			
Współczynnik Poisson'a $\nu$ [-]	0,3			

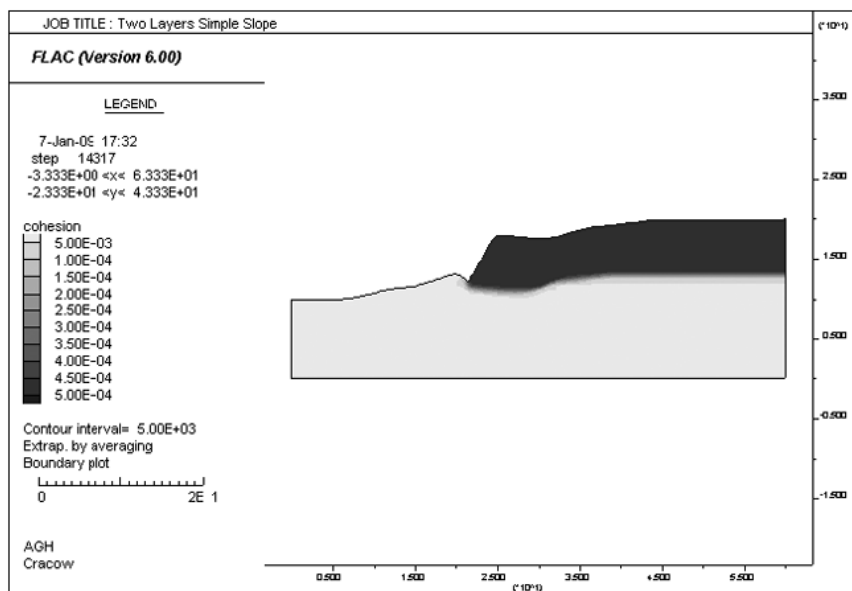
Parametry obliczeniowe zostały dobrane w taki sposób, aby najlepiej zobrazować założone idee. Dodać należy, że funkcja *automatic rezoning* sprawia duże problemy podczas obliczeń i niestety wymaga przeliczenia dużej ilości modeli aby uzyskać miarodajne wyniki. Przy założonych parametrach ośrodków i geometrii należy wielokrotnie przeliczać model zmieniając parametr związany z częstością występowania *automatic rezoning* (*set geometry*) który określa stosunek trójkątnej podstrefy (powstającej przez podział elementu czworokątnego krótszą przekątną) do całego pola tego elementu. Domyślnie parametr ten ma war-

tość 0,19 co oznacza że gdy pole jednej z dwóch podstref będzie mniejsze niż 20% całego elementu zostanie wywołana procedura REZONE. Zwiększając wartość tego parametru zwiększamy częstość występowania procedury *automatic rezoning*. Analizowano wszystkie modele zmieniając wartość parametru w zakresie  $0,19 \div 0,4$  i stwierdzono, że dla każdego modelu należy znaleźć taką wartość parametru *set geometry* aby *rezoning* występował stosunkowo często, ale tak aby nie wpływał zbyt mocno na dokładność wyników związaną z pewnymi przybliżeniami stosowanym podczas przebudowywania siatki elementów. Z dotychczasowych doświadczeń wynika, że wartość tego parametru w granicach  $0,19 \div 0,3$  daje najlepsze wyniki.

### Wariant 1

W pierwszym wariantcie ośrodek stanowiący „Warstwę 1” jest dużo mocniejszy i cięższy od znajdującego się niżej materiału. W wyniku działania ciężaru wierzchniej warstwy dochodzi do wyparcia słabszego gruntu w podstawie skarpy (rys. 3). Dodając obciążenie np. od budynku na powierzchnię warstwy górnej można dzięki procedurze *automatic rezoning* uzyskać jeszcze większe odkształcenia podłoża, tj. większą ilość wypartego gruntu.

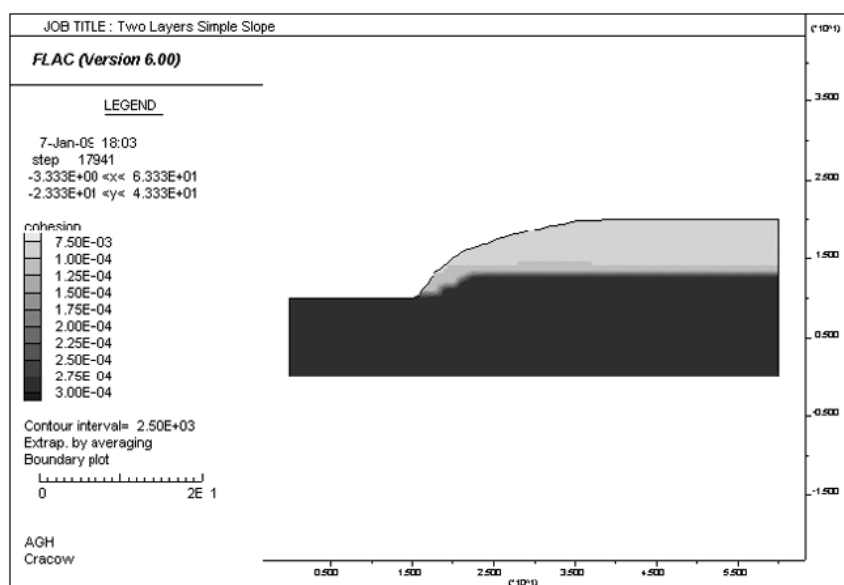
Na styku dwóch ośrodków widać charakterystyczne, ciągle przejście pomiędzy różnymi wartościami kohezji. Nawet po wielokrotnym przebudowaniu siatki elementów i stosunkowo dużym odkształceniu modelu warstwa przejściowa zachowuje swój kształt (cienkiej linii) dopasowanej do nowej granicy pomiędzy ośrodkami.



Rys. 3. Geometria modelu wraz z mapą kohezji po ustaniu procesu wypierania słabszego gruntu spod podstawy — Wariant 1

## Wariant 2

W drugim wariancie wierzchnia warstwa jest modelowana jako słabsza. W wyniku działania siły grawitacji warstwa ta zaczyna się obsuwać (zsyptywać) po znajdującej się niżej warstwie (rys. 4). W tym przypadku ponownie widać płynne przejście pomiędzy różnymi warstwami kohezji, jednakże w koluwium osuwiska można zauważyć zwiększoną wartość kohezji. Jest to związane ze specyfiką działania procedury *automatic rezoning*. Uśrednia ona wartość kohezji z sąsiadujących elementów, co przy niewielkiej wysokości zsuwającego się ośrodka powoduje „podciąganie” wartości kohezji z dolnej mocniejszej warstwy. Dlatego, na obecnym etapie badań można zalecić, aby liczba elementów w pionie, w miarodajnym (w zależności od przewidywanego kształtu koluwium osuwiska) przekroju wynosiła minimum 5. Wraz ze zwiększaniem tej wartości, co niestety wiąże się ze znacznym wydłużeniem czasu obliczeń, wpływ warstwy niższej można znacznie zminimalizować.



Rys. 4. Geometria modelu wraz z mapą kohezji po ustabilizowaniu się osuwiska — Wariant 2

## 4. Wykorzystanie procedury *automatic rezoning* do analizy rzeczywistego osuwiska na przykładzie osuwiska w miejscowości Gaj

Możliwość zastosowania procedury *automatic rezoning* do analizowania przebiegu procesów osuwiskowych przedstawiono na przykładzie zaistniałego osuwiska w miejscowości Gaj niedaleko Krakowa przy drodze E77 Kraków — Chyżne. Osuwisko (zsuw insekwentny)

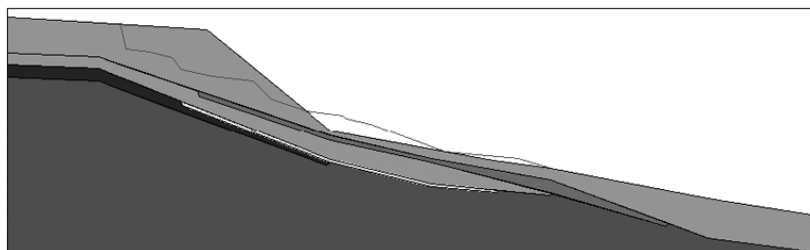
o objętości mas osuwiskowych około  $130 \text{ m}^3$  (rys. 5) wystąpiło w kwietniu 2006 roku w obrębie skarpy o wysokości 8 m i nachyleniu  $40^\circ$  stanowiącej część zbocza doliny o generalnym nachyleniu około  $12^\circ$  i powierzchni około 5 ha. Bezpośrednio pod wierzchnią warstwą gleby (humus) znajdują się utwory czwartorzędowe, reprezentowane przez pyły, piaski drobne i ły [2]. Budowa geologiczna otaczającego terenu tj. upad warstw zgodny z nachyleniem zbocza sprzyja występowaniu osuwisk, co zostało zaobserwowane podczas badań *in situ*. Na obszarze analizowanego zbocza stwierdzono występowanie wielu starych koluwiów osuwiskowych, zrzutów i pęknięć gruntu oraz pochylone drzewa czyli tzw. „pijany las”. W trakcie badań stwierdzono występowanie wód gruntowych o zwierciadle naporowym oraz wody pochodzące z opadów i roztopów. Na dnie doliny znajduje niewielki zbiornik wodny (staw) o zmiennym, w zależności od pory roku, poziomie zwierciadła wody. Analizując powyższe można stwierdzić, że teren jest aktywny osuwiskowo.

Osuwisko wystąpiło tylko w górnej (najbardziej stromej) skarpie na długości 10 m jej górnej krawędzi. Materiał z mas osuwiskowych, których zrzut dochodził do 2 metrów utworzył charakterystyczne poziome tarasy wzdłuż całego koluwium osuwiskowego (rys. 6). Wskazują one na dynamiczny charakter opisywanego zjawiska, czyli nagłego znacznego uplastycznienia bądź nawet upłynnienia gruntu (tikotropia). Grunt zdeponowany w koluwiach osuwiska był w stanie płynnym co może potwierdzać wspomnianą przyczynę osuwiska. Wystąpienie w tym przypadku zjawiska tikotropii spowodowane zostało najprawdopodobniej podwyższeniem zwierciadła wody gruntowej, zwiększeniem wilgotności (nasączeniem) gruntu zalegającego powyżej zwg. oraz drganiem od pojazdów ciężarowych przejeżdżających drogą E77 znajdującą się w odległości około 30 metrów od miejsca zaistnienia osuwiska.



Rys. 5. Widok na osuwisko (charakterystyczne poziome tarasy) [2]

W oparciu o wyniki badań *in situ* i badań laboratoryjnych stworzono model obliczeniowy w programie FLAC 6.0 (rys. 6), któremu przypisano parametry podane w tabeli 2. Na tym samym rysunku zamieszczono również profil zaistniałego osuwiska.



**Rys. 6.** Geometria modelu wraz z profilem zaistniałego osuwiska (numeracja warstw od najwyższej położonej do najgłębszej)

Parametry wytrzymałościowe przyjęte do obliczeń zostały określone zgodnie z normą PN-B-03020:1981 Grunty budowlane — Posadowienie bezpośrednio budowli — Obliczenia statyczne i projektowanie. Aby zamodelować zjawisko tiksotropii zmniejszono o połowę parametry w czterech warstwach znajdujących się najbliżej powierzchni (tangens kąta tarcia wewnętrznego i kohezję) w stosunku do parametrów określonych zgodnie z ww. normą. W nawiasach podano wartości normowe. Obniżenie o połowę wartości kąta tarcia i kohezji wynika stąd, że starano się obniżając w równym stopniu wspomniane parametry otrzymać profil osuwiska najbliższy rzeczywistości. Wybór akurat czterech warstw w których obniżono parametry wynika stąd, że są one zbudowane z gruntów podatnych na zjawisko tiksotropii (pyły i ły) oraz to, że mogły one zostać swobodnie nasączone wodą przemieszczającą się w dół zbocza po warstwie nieprzepuszczalnych łąw (najgłębsza warstwa). Przyjęto uproszczenie polegające na założeniu jednakowego wpływu kohezji i kąta tarcia wewnętrznego na kształt profilu osuwiska w celu uproszczenia obliczeń i zmniejszenia możliwych kombinacji parametrów wytrzymałościowych.

Ze względu na niewielki wpływ indywidualnych parametrów odkształceniowych na wyniki obliczeń, zamiast dobierać je dla każdego ośrodka, zostały one uśrednione w celu uproszczenia obliczeń i tak już wystarczająco problematycznych przy tej postaci funkcji *automatic rezoning*.

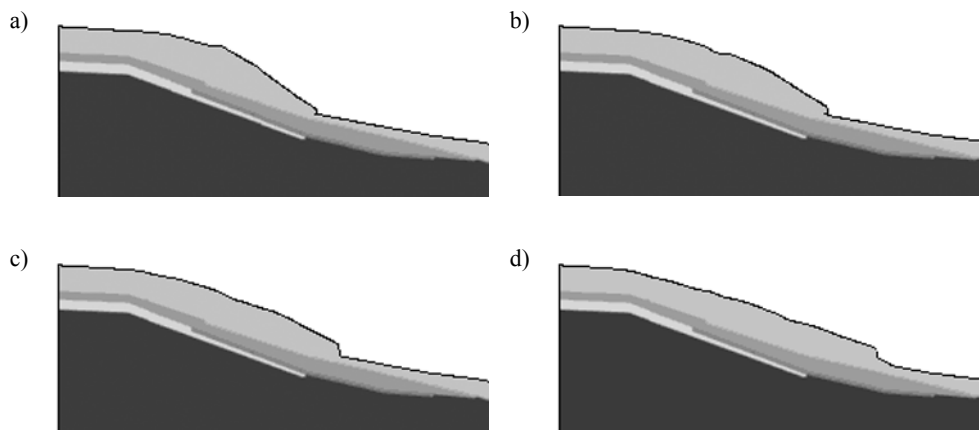
Wpływ wody gruntowej został uwzględniony w obniżonych parametrach wytrzymałościowych czterech wierzchnich warstw, ponieważ zjawisko upłynnienia gruntu jest nieodłącznie związane z działaniem wody.

Analizując wyniki można zauważyć, że obsunięcie skarpy nastąpiło tylko w wierzchniej warstwie pyłów (rys. 7 i 8). Potwierdzają to również analizy wskaźnika stateczności zarówno metodami równowagi granicznej jak i metodą redukcji wytrzymałości na ścinanie w których powierzchnia poślizgu przebiega tylko w pyłach. Niższe warstwy gruntu nie ulegają przemieszczeniu, nawet pomimo obniżonych parametrów wytrzymałościowych.

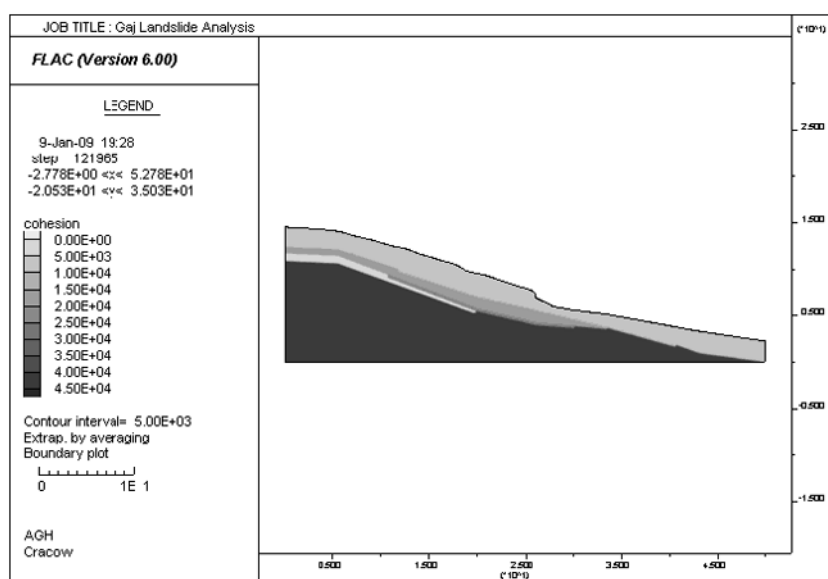
TABELA 2  
Parametry modelu obliczeniowego

Materiał	Warstwa 1	Warstwa 2	Warstwa 3	Warstwa 4	Warstwa 5	Warstwa 6
	Pył	Pył + il + + piasek drobny	Il górny	Il + żwir	Piasek drobny	Il dolny
Gęstość objętościowa $\rho_d$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2150	2310	2040	2310	2040	2200
Kąt tarcia wewnętrzznego $\varphi$ [°]	3,61 (7,2)	5,45 (10,8)	3,61 (7,2)	4,07 (8,1)	29,3	9,9
Kohezja $c$ [kPa]	7,2 (14,4)	9,9 (19,8)	18,9 (37,8)	25,2 (50,4)	0,0	45,0
Wytrzymałość na rozciąganie $t$ [kPa]	0					
Kąt dylatacji $\delta$ [°]	0					
Moduł sprężystości podłużnej $E$ [MPa]	50					
Współczynnik Poisson'a $\nu$ [-]	0,3					
Model ośrodka	model sprężysto-plastyczny Coulomba-Mohra					
Woda gruntowa	uwzględniono w obniżonych parametrach warstw (patrz tekst)					





Rys. 7. Geometria modelu wraz z mapą kohezji w kolejnych etapach procesu osuwiskowego



Rys. 8. Geometria modelu wraz z mapą kohezji po ustaniu procesów osuwiskowych

Kształt osuwiska nieznacznie odbiega od rzeczywistego profilu. Jest to związane z tym, że osuwisko było procesem dynamicznym, a przeprowadzona analiza jest raczej quasi-statyczną. Dodatkowym czynnikiem wpływającym na różnice pomiędzy rzeczywistością, a wynikami obliczeń jest założenie ciągłości ośrodka. Aby można było lepiej modelować tego typu zjawiska należałoby wykorzystać funkcję powierzchni kontaktu (*interface*), której niestety nie obsługuje funkcja *automatic rezoning* w obecnej implementacji.

## 5. Wnioski

Procedura *automatic rezoning* może znacznie rozszerzyć zastosowanie metody różnic skończonych, a tym samym programu FLAC do analiz utraty stateczności zboczy. Niestety w swojej obecnej formie nie może być jeszcze stosowana do wszystkich przypadków. Niewątpliwie największą niedogodnością jest brak możliwości stosowania powierzchni kontaktu (*interface*), oraz polecenia *attach* które znacznie ułatwia tworzenie siatek stref, a tym samym pozwala znacznie przyspieszyć obliczenia.

Numeryczna analiza procesu osuwiskowego jest zagadnieniem o znacznym stopniu skomplikowania i w niewystarczającym stopniu rozpoznany. Należy tutaj rozróżnić dwa typy osuwisk — dynamiczne (osuwiska o bardzo szybkim przebiegu procesu) i quasi-statyczne (osuwiska trwające miesiącami, a nawet latami, jak np. większość dużych osuwisk w kopalniach odkrywkowych). Analizy wykonane w niniejszej pracy odnoszą się do procesów quasi-statycznych, procesy dynamiczne będą tematem dalszych badań.

Na obecnym etapie badań, można ostrożnie stwierdzić że najlepszym polem dla zastosowań procedury *automatic rezoning* są przypadki pośrednie, tj. takie w których występują na tyle duże odkształcenia wpływające na proces obliczeniowy z którymi nie radzi sobie program FLAC w trybie dużych odkształceń, ale nie tak duże jak w przypadku osuwisk. Dobrym przykładem jest tutaj model z pierwszego wariantu pierwszego przykładu.

Pomimo istotnych wad w aktualnej implementacji, procedura może być przydatna tam, gdzie potrzebna jest m.in. ocena skali zjawiska i jego zasięgu oraz wpływu zmiany geometrii zbocza na jego późniejszą stateczność.

## LITERATURA

- [1] FLAC v. 6.0 2008: User's Manual Itasca Consulting Group. Minneapolis
- [2] *Olesiak S.*: Przyczyny powstania osuwiska w miejscowości Gaj i propozycja jego zabezpieczenia. I Krakowska Konferencja Młodych Uczonych, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, 2006, Kraków, 519–528