

*Marek Cala**, *Michał Kowalski**

ANALIZA STATECZNOŚCI SKARP Z GRUNTU ZBROJONEGO**

1. Wprowadzenie

Analiza stateczności skarp i zboczy, zarówno naturalnych, jak i powstałych w wyniku działalności człowieka, jest jednym z najważniejszych zadań mechaniki gruntów i geotechniki. Do niedawna do oceny stateczności skarp stosowane były głównie tzw. metody równowagi granicznej (LEM), w których zakłada się znajomość kształtu i położenia powierzchni poślizgu. W metodach tych miarą stateczności jest wskaźnik, obliczany jako stosunek uogólnionych sił utrzymujących równowagę bryły sztywnej do sił zsuwających. Przeprowadzenie obliczeń dla wielu powierzchni poślizgu o zróżnicowanej lokalizacji umożliwia wyznaczenie najmniejszej wartości wskaźnika, który jest miarą stateczności danego obiektu geotechnicznego. Statyczna niewyznaczalność zadania, przy różnych od prostoliniowych kształtach powierzchni poślizgu, wymaga podziału potencjalnej bryły osuwiskowej na paski (bloki) oraz przyjęcia dodatkowych założeń odnośnie sił oddziaływania pomiędzy nimi. Jest to przyczyna powstawania licznych błędów, które powodują, że metody te należy traktować jako przybliżone, a ich stosowanie do celów praktycznych wymaga przyjmowania wysokich wartości współczynników bezpieczeństwa. Metody równowagi granicznej stwarzają pewne możliwości symulacji zbrojenia masywu gruntowego poprzez zastosowanie kotwi, gwoździ czy też geosiatek, należy jednakże mieć na uwadze, że jakiegokolwiek zbrojenie gruntu jest uwzględniane w obliczeniach tylko za pomocą odpowiednio przyłożonych sił.

W ostatnich latach do rozwiązywania zadań związanych ze statecznością skarp i zboczy coraz częściej stosuje się metody numeryczne. Zakłada się w nich, że skarpa stanowi

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

** Pracę wykonano w ramach prac statutowych AGH, nr umowy 11.11.100.197, finansowanych ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego

część półprzestrzeni sprężystej lub sprężysto-plastycznej. Do określania wskaźnika stateczności wykorzystuje się najczęściej metodę redukcji wytrzymałości na ścinanie (SSR), która polega na zmniejszaniu wartości parametrów wytrzymałościowych w kolejnych krokach, aż do wystąpienia niestabilności procesu numerycznego [1, 2]. Zastosowanie metod numerycznych daje znacznie większe możliwości modelowania gruntu zbrojonego. Wykorzystywane do tego elementy strukturalne są (podobnie jak masyw gruntowy) odkształcalne i potrafią, w miarę wiernie, symulować współpracę gruntu ze zbrojeniem.

W ostatnich latach, dla zapewnienia stateczności skarp, stosuje się często gwoździe lub kotwie współpracujące z gruntem częściowo lub na pewnym odcinku. Tego typu elementy zbrojące zapewniają globalną stateczność zbocza, uniemożliwiając wystąpienie głębokich powierzchni poślizgu. Większość stromych zboczy (gruntowych czy też skalnych) wymaga jednakże dodatkowej ochrony powierzchniowej dla zapewnienia stateczności lica skarpy. Można tutaj stosować torkret lub siatki różnego typu, których rolą jest stabilizacja części lica skarpy pomiędzy kotwiami lub gwoździami. Trudno jest uwzględnić siatkę stabilizującą powierzchnię skarpy w analizach stateczności. Praktycznie jest to niemożliwe z zastosowaniem metod równowagi granicznej, ze względu na powierzchniową lokalizację zbrojenia. Istnieją jednakże pewne możliwości modelowania zbrojenia powierzchniowego skarp z zastosowaniem metod numerycznych.

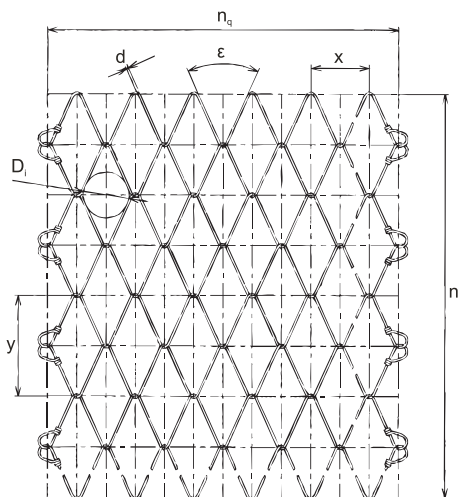
Do modelowania numerycznego wykorzystano program FLAC oparty na metodzie różnic skończonych [3]. Przyjęto, że grunt skarpy jest zbrojony za pomocą gwoździ oraz siatki stalowej typu TECCO[®], która charakteryzuje się bardzo wysokimi parametrami wytrzymałościowymi. Praktyczne obserwacje wielu skarp z gruntu zbrojonego systemami gwoździ i siatek stalowych dały asumpt do hipotezy, że zbrojenie lica skarpy siatkami TECCO[®] ma wpływ nie tylko na stateczność jej powierzchni, lecz także na stateczność globalną. W celu weryfikacji tej hipotezy przeprowadzono szereg cykli obliczeń numerycznych, uzyskując interesujące rezultaty.

2. Charakterystyka siatek TECCO[®]

Siatka TECCO[®] służy do stabilizacji stromych skarp gruntowych i skalnych. Zabezpieczoną powierzchnię skarpy pokrywa się siatką z drutu stalowego, mocowaną do gwoździ za pomocą specjalnych płytek kotwiących. Poprzez dokręcanie nakrętek gwoździ siatka jest odpowiednio napinana dla lepszej współpracy z gruntem.

Siatka TECCO[®] jest wykonana z drutu stalowego pokrytego powłoką antykorozyjną. Drut wykonany jest ze stali węglowej i charakteryzuje się wytrzymałością na rozciąganie przekraczającą 1770 MPa. Podstawowe parametry geometryczne siatki są przedstawione na rysunku 1 oraz w tabeli 1.

Próby rozciągania przeprowadzone na siatce o wymiarach 1 × 1 m wskazują na jej średnią nośność równą 167,07 kN/m przy średnim wydłużeniu 60,51 mm/m [4].



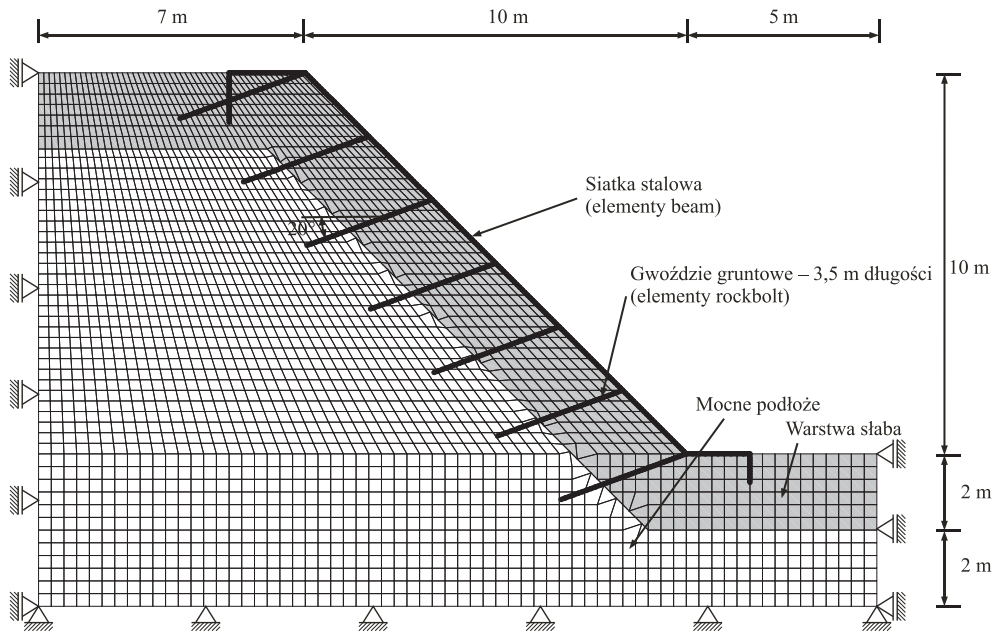
Rys. 1. Podstawowe parametry geometryczne siatki

TABELA 1
Wybrane wymiary siatki TECCO®

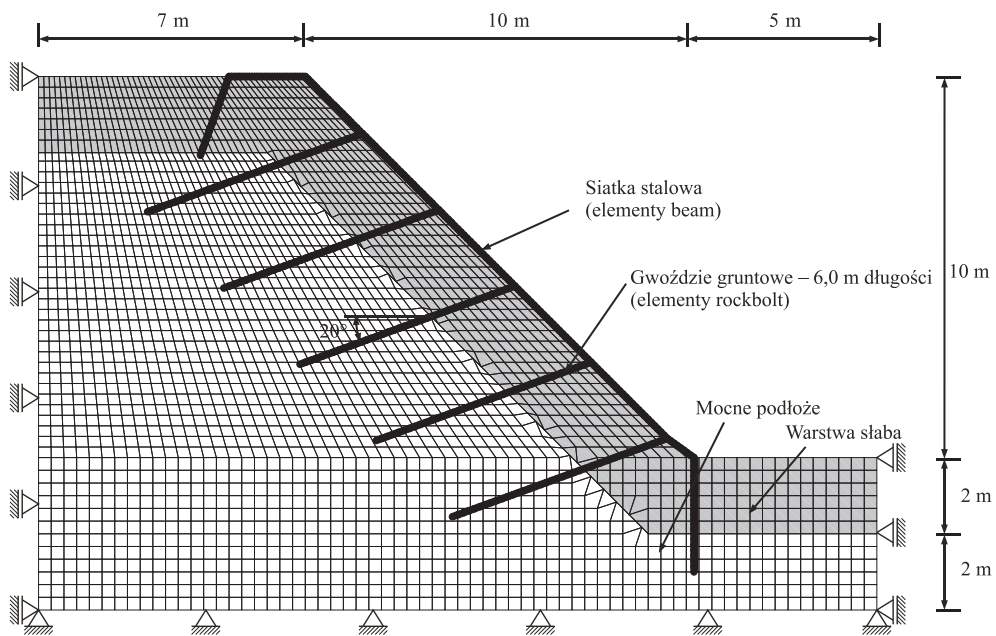
Parametr	Wielkość
Kształt oczek	romboidalny
Wielkość oczek, $x \times y$	83 × 143 mm
Średnica okręgu wpisanego w oczko, D_i	65 mm
Kąt rozwarcia drutu w oczku, ϵ	49°
Średnica drutu, d	3 mm
Ilość oczek w pionie, n_l	7 sztuk/m
Ilość oczek w poziomie, n_q	12 sztuk/m

3. Analiza stateczności skarpy z gruntu zbrojonego

Rozpatrywane zbocze ma wysokość 10 m i kąt nachylenia równy 45°. Założono, że jest zbudowane z warstwy gruntu o niskich parametrach wytrzymałościowych i odkształceniowych oraz o miąższości 2 m („warstwa słaba”). Zalega ona na mocniejszym i bardziej sztywnym podłożu, co jest często spotykane w rzeczywistości („mocne podłoże”). Oba rodzaje gruntów były modelowane za pomocą sprężysto-idealnie plastycznego ośrodka Coulomba–Mohra. Przyjęto, że zasadniczym elementem utrzymującym stateczność skarpy są gwoździe. Rozpatrzone dwa schematy instalacji gwoździ (rys. 2 i rys. 3).



Rys. 2. Geometria skarpy wraz z pierwszym schematem gwoździowania



Rys. 3. Geometria skarpy wraz z drugim schematem gwoździowania

Pierwszy schemat obejmował instalację 7 rzędów gwoździ o długości 3,5 m, a drugi zabudowę 5 rzędów o długości 6 m. Dla obu schematów założono krok gwoździowania równy 2 m. Właściwości mechaniczne warstw gruntu przedstawiono w tabeli 2.

Wszystkie analizy przeprowadzono w płaskim stanie odkształcenia z zastosowaniem programu metody różnic skończonych FLAC [3]. Założono, że ośrodek gruntowy zachowuje się zgodnie z niestowarzyszonym prawem plastycznego płynięcia.

TABELA 2

Parametry mechaniczne warstw gruntu

Parametr	Warstwa słaba	Mocne podłoże
Ciężar objętościowy, γ	21 kN/m ³	24 kN/m ³
Moduł Younga, E	10 MPa	100 MPa
Współczynnik Poissona, ν	0,25	0,3
Kohezja, c	15 kPa	80 kPa
Kąt tarcia wewnętrznego, φ	18°	26°

Gwoździe gruntowe są modelowane jako elementy strukturalne typu *rockbolt*. Założono, że gwoździe stanowią pręty stalowe o średnicy 30 mm, które instalowane są w otworach o średnicy 55 mm, wypełnionych spoiwem na bazie zaprawy cementowej. Dla każdej warstwy założono inne parametry współpracy gwoździ z gruntem wynikające z właściwości ośrodka. Parametry elementów strukturalnych symulujących gwoździe zamieszczono w tabeli 3.

TABELA 3

Parametry przyjęte dla gwoździ (elementy strukturalne *rockbolt*)

Parametr	Warstwa słaba	Mocne podłoże
Promień, r	0,015 m	0,015 m
Krok, k	2,0 m	2,0 m
Moduł Younga, E_n	200 GPa	200 GPa
Moment uplastyczniający	487 Nm	487 Nm
Nośność, Y_n	125 kN	125 kN
Krytyczne odkształcenie	0,01	0,01
Sztywność w kierunku normalnym, K_{nn}	500 MN/m/m	2000 MN/m/m
Kohezja w kierunku normalnym	10 kN/m	30 kN/m
Kąt tarcia w kierunku normalnym	0°	0°
Sztywność w kierunku stycznym, K_{sn}	100 MN/m/m	500 MN/m/m
Kohezja w kierunku stycznym	30 kN/m	90 kN/m
Kąt tarcia w kierunku stycznym	0°	0°

Siatka stalowa TECCO[®] była modelowana jako element belkowy (*beam*), z założeniem kontaktu pomiędzy gruntem a siatką. Parametry elementów typu *beam* określono na podstawie badań wytrzymałościowych siatek TECCO[®] przeprowadzonych przez Storrlein i Brandleina [4]. Parametry siatki stalowej oraz kontaktu pomiędzy siatką a gruntem przedstawiono w tabelach 4 i 5.

TABELA 4
Parametry przyjęte dla siatki TECCO[®]

Parametr	Wielkość
Powierzchnia, A	1,69696 e-4 m ²
Moment bezwładności, I	1,0E-10 m ⁴
Moduł Younga, E_w	16279 MPa
Wytrzymałość na rozciąganie, Y_w	984,8 MPa
Reszkowa wytrzymałość na rozciąganie, Y_{rw}	984,8 MPa
Moment uplastyczniający	0,1 Nm

TABELA 5
Parametry kontaktu siatka-grunt

Parametr	Wielkość
Sztywność normalna, S_i	670 MPa/m
Sztywność styczna, K_i	670 MPa/m
Kohezja, c_i	0 Pa
Kąt tarcia wewnętrznego, φ_i	5°

Wszystkie analizy stateczności rozpatrywanych skarp zostały przeprowadzone w oparciu o metodę redukcji wytrzymałości na ścinanie (SSR). Obliczenia przeprowadzono w następujących etapach:

- etap 1 — analiza stateczności zbocza z gruntu niezbrojonego — ten etap traktowano jako bazowy dla kolejnych przeliczeń uwzględniających różne sposoby poprawy stateczności skarpy,
- etap 2 — etap 1 + instalacja gwoździ bez naciągu,
- etap 3 — etap 1 + instalacja gwoździ z naciągiem,
- etap 4 — etap 2 + instalacja siatki TECCO[®],
- etap 5 — etap 3 + instalacja siatki TECCO[®].

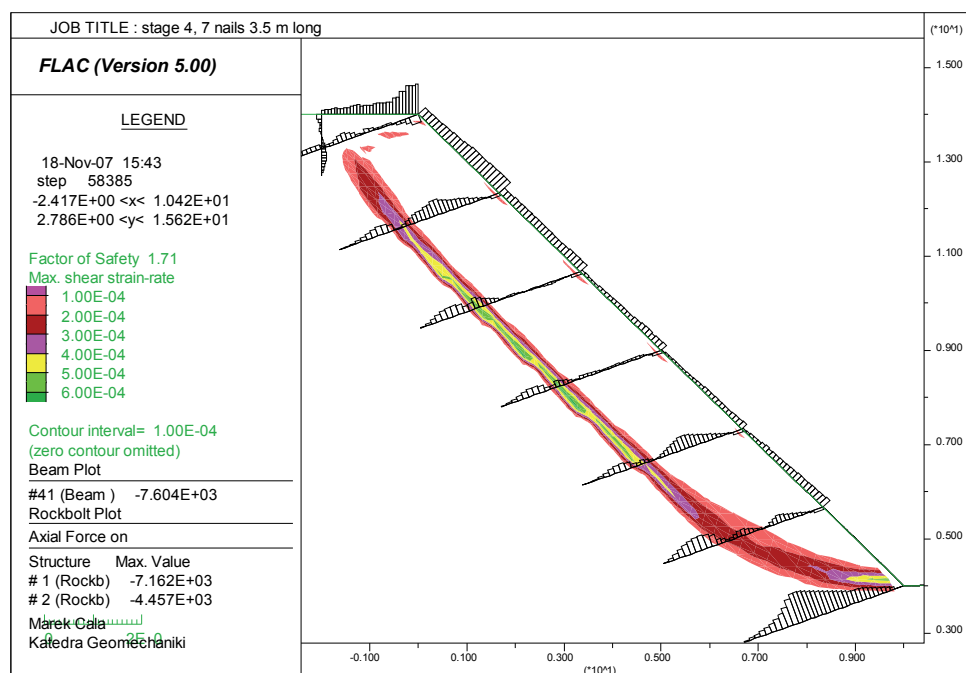
W programie FLAC nie ma wprost możliwości zadawania naciągu dla elementów typu *rockbolt*, dla uzyskania naciągu napisano zatem specjalną procedurę w wewnętrznym języku programowania FISH. Przed przystąpieniem do naciągania gwoździ redukuje się moduł

Younga pierwszego elementu gwoździ od powierzchni z wartości 200 GPa do wartości 2 GPa. Pozwala to na uzyskanie relatywnie dużych odkształceń w tym elemencie, co umożliwia dobre naciągnięcie siatki. Następnie ustawiany jest tryb dużych odkształceń. Wstępny naciąg gwoździ zadawany jest iteracyjnie w krokach po 200 N (w celu osiągnięcia przykładowej wartości 20 kN wstępnego naciągu należy wykonać 100 kroków iteracyjnych). Po każdym kroku iteracyjnym wykonuje się określoną ilość kroków obliczeniowych, a po ostatnim cyklu obciążenia rozwiązuje się model komendą *solve*.

3.1. Wyniki analizy stateczności skarp z gruntu zbrojonego

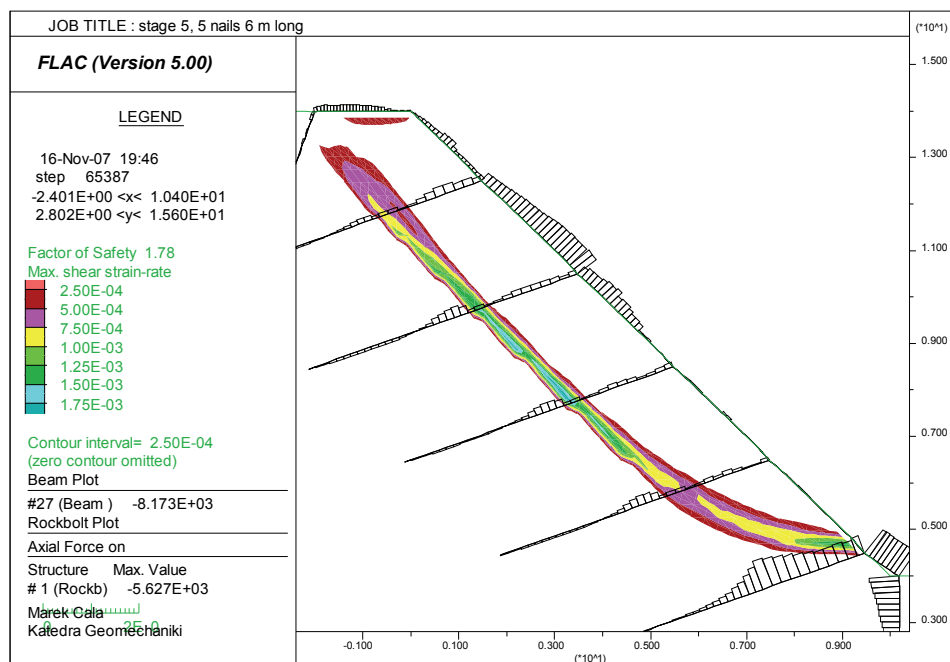
Oba schematy gwoździowania zostały tak dobrane, aby uzyskać wartości wskaźnika stateczności większe niż 1,5. Zastosowanie naciągu gwoździ z siłą 40 kN powoduje wzrost wartości wskaźników stateczności (*FS*) o 0,09 dla obu rozpatrywanych schematów gwoździowania. Instalacja siatki TECCO[®] z gwoździami bez naciągu wywołała wzrost wartości *FS* odpowiednio o 0,08 dla schematu 1 oraz o 0,17 dla schematu 2. Podobnie instalacja siatki TECCO[®] z gwoździami z naciągiem 40 kN spowodowała wzrost wartości *FS* odpowiednio o 0,08 dla schematu 1 oraz o 0,17 dla schematu 2.

Na rysunku 4 pokazano siły osiowe w gwoździach i siatce dla etapu 4 pierwszego schematu gwoździowania.



Rys. 4. Siły osiowe w gwoździach (bez naciągu) i siatce stalowej dla etapu 4 (pierwszy schemat gwoździowania)

Na rysunku 5 pokazano siły osiowe w gwoździach i siatce dla etapu 5 drugiego schematu gwoździowania.



Rys. 5. Siły osiowe w gwoździach (z naciągami) i siatce stalowej dla etapu 5 (drugi schemat gwoździowania)

Widać wyraźnie, że zastosowanie naciągu powoduje lepszą współpracę pomiędzy gwoździami i siatką stalową. Wyniki analiz stateczności dla obu rozpatrywanych schematów przedstawiono w tabeli 6.

TABELA 6

Zestawienie wskaźników stateczności (FS) dla obu rozpatrywanych schematów

Skarpa	7 rzędów gwoździ (długość 3,5 m)	5 rzędów gwoździ (długość 6 m)
Bez zbrojenia	1,08	1,08
Gwoździe bez naciągu,	1,63	1,52
Gwoździe z naciągami (40 kN)	1,74	1,61
Gwoździe bez naciągu + siatka TECCO®	1,71	1,69
Gwoździe z naciągami (40 kN) + siatka TECCO®	1,82	1,78

4. Analiza stateczności skarpy w Milówce

Przedmiotowa skarpa jest zlokalizowana na drodze krajowej numer 69 w rejonie miejscowości Milówka. Powyżej górnej krawędzi skarpy przebiegała droga polna. Aby umożliwić wykonanie rowu oraz jednocześnie zachować istniejącą drogę polną, skarpe powyżej przeprofilowano do nachylenia 1:1. Na rozpatrywanym odcinku skarpa miała maksymalną wysokość 4,5 m. Skarpa zbudowana jest z gliniasto-rumoszowej pokrywy zwietrzelinowej o zmiennej grubości wahającej się od 1,0 m do 1,5 m, zalegającej na podłożu fliszowym zbudowanym z silnie zwietrzałych łupków ilastych. Własności mechaniczne warstw gruntu zamieszczono w tabeli 7. Przeprofilowanie skarpy o takiej budowie geologicznej wymagało jej zabezpieczenia.

TABELA 7

Parametry mechaniczne warstw dla skarpy Milówka

Parametr	Pokrywa zwietrzelinowa	Podłoże fliszowe
Ciężar objętościowy, γ	2100 kg /m ³	2400 kg/m ³
Moduł Younga, E	90 MPa	90 MPa
Współczynnik Poissona, ν	0,3	0,3
Kohezja, c	15 kPa	80 kPa
Kąt tarcia wewnętrznego, φ	14°	26°

Dla zapewnienia stateczności skarpy zastosowano zbrojenie za pomocą gwoździ gruntowych typu TITAN 30/11 o długości 3 m połączonych z siatką stalową TECCO[®]. Do analiz stateczności przyjęto parametry gwoździ, siatki oraz kontaktu przedstawione odpowiednio w tabelach 3, 4, i 5. Wyniki analiz stateczności przedstawiono w tabeli 8.

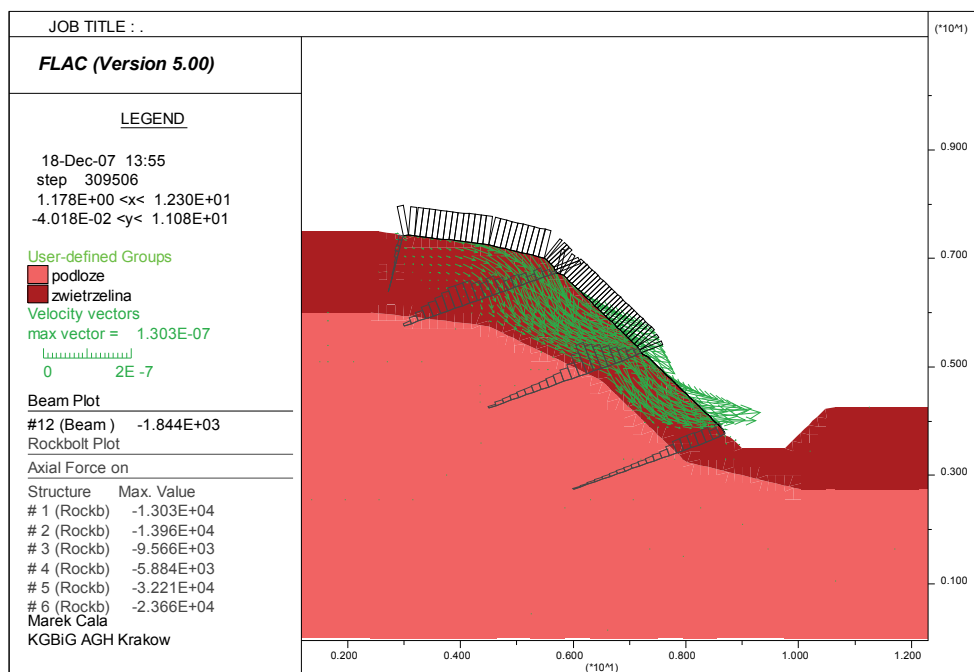
TABELA 8

Zestawienie wskaźników stateczności (FS) dla skarpy Milówka

Skarpa	FS
Bez zbrojenia	2,08
Gwoździe bez naciągu,	2,74
Gwoździe z naciągiem (20 kN)	2,78
Gwoździe bez naciągu + siatka TECCO [®]	2,80
Gwoździe z naciągiem (20 kN) + siatka TECCO [®]	2,90

Zastosowanie naciągu gwoździ z siłą 20 kN powoduje niewielki wzrost FS o 0,04, zaś instalacja siatki TECCO[®] z gwoździami bez naciągu wywołała wzrost wartości FS odpo-

wiednio o 0,07. Instalacja siatki TECCO® z gwoździami z naciąganiem 20 kN spowodowała wzrost wartości FS o 0,12. Na rysunku 6 pokazano siły osiowe w gwoździach i siatce przy zastosowaniu naciągu 20 kN.



Rys. 6. Siły osiowe w gwoździach z naciąganiem 20 kN i siatce stalowej dla skarpy Milówka

5. Podsumowanie

Wyniki przeprowadzonych symulacji numerycznych wskazują, że powierzchniowe zastosowanie siatki TECCO® wywołuje wzrost wartości wskaźnika stateczności skarpy: siatka TECCO® została zaprojektowana do zapewnienia stateczności przypowierzchniowej warstwy gruntu. Warto jednakże zauważyć, że zastosowanie siatki o tak wysokich parametrach wytrzymałościowych wpływa na globalną stateczność skarpy. Siatka TECCO® w połączeniu z systemem gwoździ wywołuje wzrost globalnego wskaźnika stateczności skarpy. Przeprowadzone obliczenia wskazują, że globalny wskaźnik stateczności wzrasta o wartości od 0,06 do 0,17 dla różnych rozpatrywanych sytuacji. Wzrost wartości FS zależy od geometrii skarpy, właściwości mechanicznych gruntu (skał) oraz od rozmieszczenia i typu gwoździ. Wzrost wartości wskaźnika stateczności na poziomie 0,1 może być interesujący przy projektowaniu systemów zbrojenia gruntu. Nadwyżkę FS można wykorzystać na przykład do optymalizacji rozmieszczenia gwoździ.

LITERATURA

- [1] *Cala M., Flisiak J.*: Slope stability analysis with FLAC and limit equilibrium methods. In Billiaux, Rachez, Detournay & Hart (eds.) *FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics — 2001*, Proceedings of the 2nd International Symposium, Lyon, France, 29–31 October. Lisse: A.A. Balkema, 2001, 111–114
- [2] *Griffiths D.V., Lane P.A.*: Slope stability analysis by finite elements. *Geotechnique*. 49(3), 1999, 387–403
- [3] Itasca Consulting Group Inc. 2005. *FLAC — Fast Lagrangian Analysis of Continua*, ver. 5.0 User's Guide. Minneapolis; Itasca
- [4] *Storrlein K.H., Brandlein P.*: Laboratory testing of slope stabilization system TECCO® G 65. Test no BPI 0400046/1. Nuremberg, LGA Bautechnik GmbH 2004