

Zastosowanie numerycznych obliczeń stateczności zboczy dla oceny potencjalnych stref przemieszczeń zwietrzelin i koluwiów rozwiniętych na podłożu fliszowym

Paweł Dobak¹, Ireneusz Gawriuczenkow¹,
Łukasz Dominik Kaczmarek¹, Kamil Kielbasiński¹, Emilia Wójcik¹



P. Dobak



I. Gawriuczenkow



L.D. Kaczmarek



K. Kielbasiński



E. Wójcik

Application of slope stability numerical calculation for evaluation of potential displacement zones in weathered and colluvial soils on the flysch base. *Prz. Geol.*, 64: 683–693.

Abstract. This study concerns the modeling potential of slopes development with use of numerical stability calculations. Boundary conditions of performed numerical simulations are according to morphological and geological engineering conditions of the flysch slope shaped by weathering and surface mass movements. The multilaminar material model was used in order to imitate shale spatial variation in weathering zones. Furthermore, X-ray computed microtomography technique enabled for visualization of varied condition of shear surface extortion, which cause physical and strength parameters diversity. Calculation outputs show that geometry and location of deformation zones are affected by a model input strength parameter. The presented results confirm utility of numerical modeling as important aspect in the investigation and verification of spatiotemporal slope development cycle.

Keywords: development of slope, stability, numerical modeling, multilaminar material model, weathering

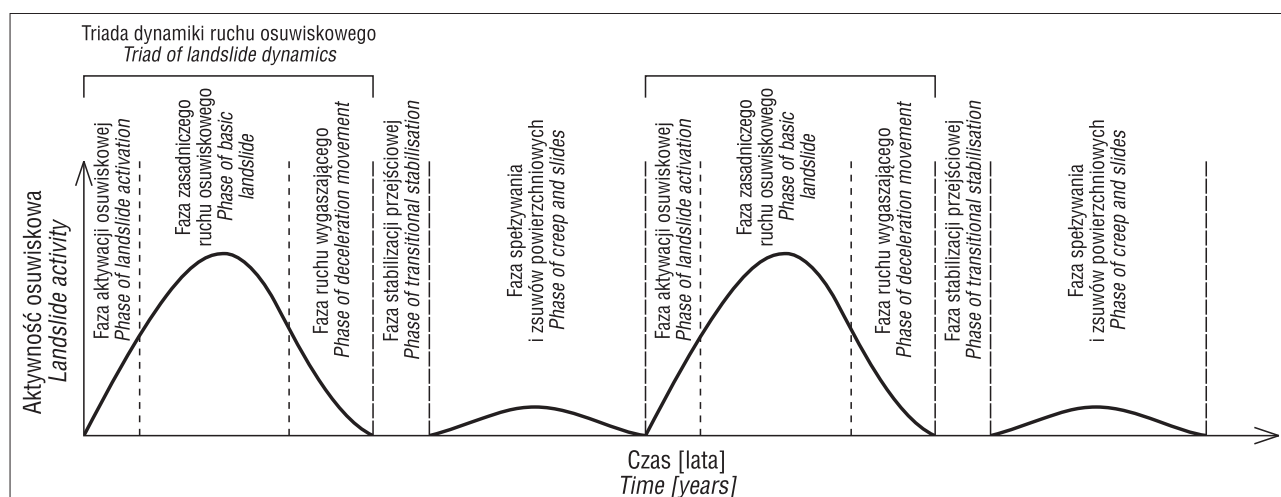
Różnorodność czynników determinujących stateczność zboczy i skarp powoduje zmienne zagrożenie obszarów predysponowanych do powstawania lub reaktywacji rozmaitych form powierzchniowych ruchów masowych (Kaczmarek & Dobak, 2015). Jednym ze sposobów zgeneralizowanej oceny warunków geologiczno-inżynierskich terenów zagrożonych ruchami masowymi są symulacje numeryczne, które pozwalają opcjonalnie prognozować kierunki rozwoju, zasięgi osuwisk, spełzania oraz umożliwiają zlokalizowanie najbardziej prawdopodobnych stref nieciągłości. W analizach tych należy uwzględnić charakter dynamiki procesów, w którym w pełnym rozwinięciu, można wyróżnić trzy fazy o zróżnicowanej prędkości przemieszczeń (Czarnecki i in., 2007). Triada obejmująca aktywację, zasadniczy rozwój oraz wygaszanie przemieszczeń jest powtarzana w historii rozwoju stoku osuwiskowego (ryc. 1) i prowadzi do ukształtowania odcińków o różnym nachyleniu i wynikającym stąd zmiennym zagrożeniu osuwiskowym. Intensywniejszym procesom osuwania (zarówno translacyjnego, jak i rotacyjnego) towarzyszy spełzanie, które występuje głównie w obrębie warstw zwietrzelinowych i koluwiów.

Kluczowym elementem w odtwarzaniu tych procesów jest właściwie określenie zarówno charakterystyki przestrzennej stoku, jak również jego budowy geologicznej. Wgłębna charakterystyka obejmuje cechy strukturalno-litologiczne oraz właściwości geomechaniczne uzyskiwa-

ne podczas badań laboratoryjnych, prowadzonych w celu określania parametrów dla modeli konstytutywnych gruntu. Wśród modelowych obliczeń coraz częściej jest wykorzystywana metoda elementów skończonych (MES), głównie ze względu na możliwość uwzględniania różnych opcji geometrycznych oraz zakładanych obciążeń. Z jej zastosowaniem spotykamy się m.in. w hydrotechnice (Kasprzak i in., 2015), geologii inżynierskiej i geotechnice (Barański i in., 2007; Bogusz & Witowski, 2015; Kaczyński i in., 2010; Koda & Osiński, 2015), w tym także w modelowaniu karpackich osuwisk fliszowych. Przykładem mogą być prowadzone w ramach programu „Systemu osłony przeciwosuwiskowej” (SOPO) prace w rejonie Gorlic, których wyniki analizowano z uwzględnieniem numerycznych obliczeń MES (Bednarczyk, 2007).

Niniejszy artykuł przedstawia zastosowanie wyników kompleksowych badań i analiz geologiczno-inżynierskich dla oceny wpływu zmiennych charakterystyk geomechanicznych na warunki stateczności zboczy, w szczególności przemieszczeń przypowierzchniowych warstw zwietrzelin i koluwiów. Celem badań laboratoryjnych i obliczeń była próba odtworzenia prawdopodobnego mechanizmu rozwoju powierzchniowych ruchów masowych, z wykorzystaniem analiz numerycznych opartych o reprezentatywne lub opcjonalne charakterystyki fizyczno-wytrzymałościowe zwietrzelin oraz koluwiów rozwiniętych na podłożu piaszczowców oraz iłolupków. W ramach symulacji nume-

¹ Instytut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-763 Warszawa; p.dobak@uw.edu.pl, i.gawriuczenkow@uw.edu.pl, lukasz.kaczmarek@uw.edu.pl, k.kielbasinski@uw.edu.pl, wojcike@uw.edu.pl.



Ryc. 1. Schemat cyklu aktywności osuwiskowej (opracowany na podstawie Czarneckiego i in., 2007)
Fig. 1. Landslide activity cycle (developed based on Czarnecki et al., 2007)

rycznych przeprowadzono modelowanie ukierunkowane na hipotetyczne odtworzenie możliwych lokalizacji powstałych w przeszłości przemieszczeń powierzchni, w odniesieniu do obecnej morfologii terenu, wraz z opcjonalną analizą parametryczną pozwalającą na określenie zmian przestrzennych potencjalnych stref nieciągłości. Zastosowano też zaawansowany model materiałowy *multilaminat*, który umożliwia redukcję charakterystyk wytrzymałościowych, w nawiązaniu do założonych kierunków osłabień powstających na skutek działania czynników egzogenicznych. W obliczeniach uwzględniono również wpływ obciążeń od zabudowy na potencjalne zmiany stateczności.

UWARUNKOWANIA GEOLOGICZNE

Model geologiczny analizowanego w obliczeniach terenu reprezentuje warunki reprezentatywne dla Karpat Zewnętrznych obejmujących masyw fliszowy zbudowany z osadów kredowych i trzeciorzędowych. Najczęściej występujące w nich kompleksy piaskowcowo-lupkowe wykazują zróżnicowane cechy geomechaniczne. W zależności od stanu naprężenia oraz wpływów cyklicznych zmian czynników zewnętrznych (temperatury, wody) w wydzielonych strefach profilu wietrzeniowego mają miejsce procesy prowadzące do uplastycznienia i znaczącego rozwoju mechanizmów reologicznych w pierwotnie kruchym, a później egzogenicznie zdeintegrowanym ośrodku strefowym. Może o tym świadczyć powstawanie specyficznych struktur tzw. haków zboczowych na nachylonych, aktywnych geodynamicznie stokach.

Ocena zmienności i wyróżnianie powierzchni osłabień w zwietrzelinach oraz różnego typu gruntach koluwalnych wymieszanych z fragmentami skał i rumoszem są utrudnione. Dotyczy to szczególnie możliwości penetracji przy wciskaniu niektórych powszechnie wykorzystywanych w geologii inżynierskiej sond (np. CPT), ograniczając precyzyjną identyfikację położenia stref osłabień i przemieszczeń. Pewną pomocą w uzyskiwaniu ciągłych charakterystyk są metody geofizyczne skorelowane z profilami wierceń rozpoznawczych, co pozwala na scharakteryzowanie głębokości występowania zespołów zwietrzelin i koluwiów.

Analizę numeryczną będącą przedmiotem artykułu przeprowadzono dla zbocza, którego całkowita długość

wynosi ok. 350 m, przy zmianie wysokości na tym odcinku rzędu 120 m i zróżnicowanych nachyleniach $\approx 26^\circ \pm 11^\circ$.

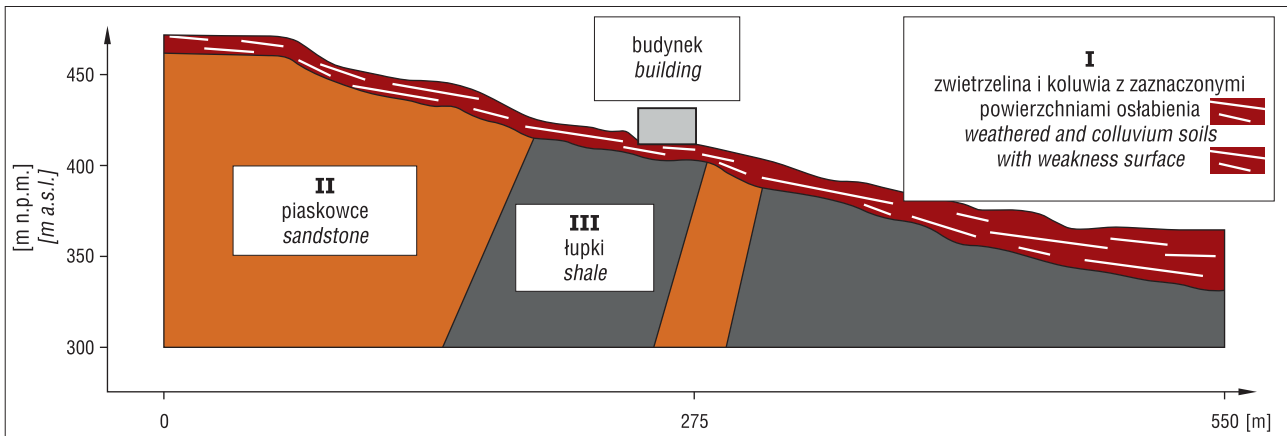
Założono, że zbocze jest zbudowane z naprzemianległych kompleksów piaskowców oraz łupków usytuowanych obsekwentnie w stosunku do nachylenia powierzchni terenu. Od powierzchni terenu występuje zespół utworów nie litych obejmujący zarówno zwietrzeliny *in situ*, jak i przemieszczony w różnym stopniu materiał (rumosze, zwietrzeliny gliniaste) oraz starsze koluwia. W przyjętym modelu ten zespół gruntowy ma zmienną miąższość – od ok. 10 m w górnej części zbocza do 35 m u jego podnóża.

Rycina 2 przedstawia schematyzację modelu budowy geologicznej, z podkreśleniem losowego występowania stref osłabień, szczególnie w dolnych partiach zwietrzelin i koluwiów. Obecność takich osłabień rzutujących na zmienność parametrów wytrzymałościowych ilustrują wyniki mikrotomografii komputerowej zwietrzałego łupka ilastego (ryc. 3), które mogą być dziedziczone w klasycznych zwietrzelinach.

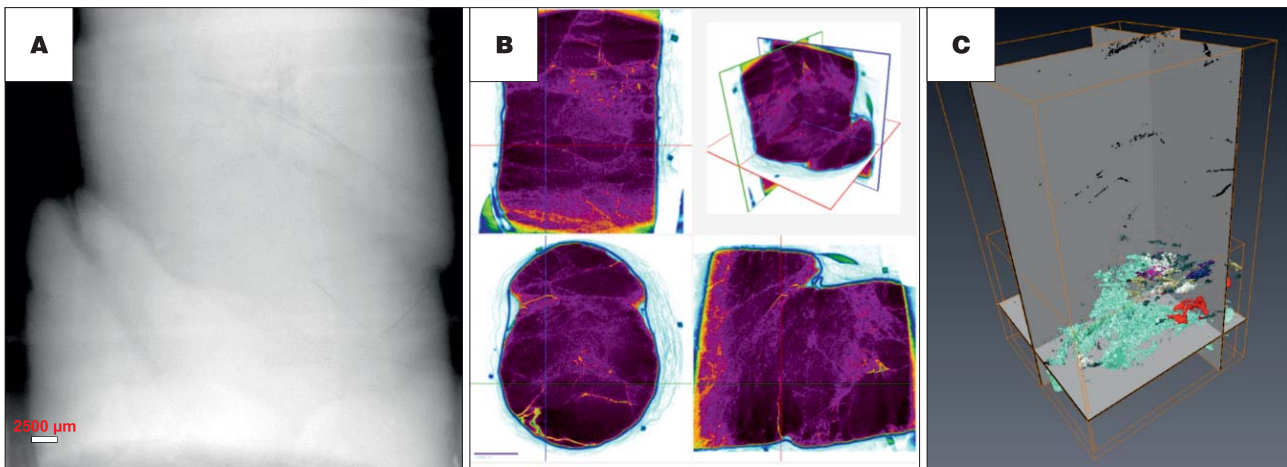
NUMERYCZNY MODEL TERENU

Wskaźnikiem zróżnicowanej podatności na przemieszczenia wydzielonych części zbocza są odwzorowania przestrzenne, które są tworzone z zastosowaniem technik numerycznego modelowania rzeźby terenu (NMT). Wykorzystanie tej techniki do badań powierzchniowych ruchów masowych w obszarze obejmującym podłoże fliszowe zostało zaprezentowane przez Chowańca i in. (2012). W prezentowanej pracy wykorzystano NMT na podstawie wyników pomiarów lotniczego skaningu laserowego (LIDAR) i przetwarzanie z wykorzystaniem programu ArcGIS. Rejestrowane dane, oprócz informacji o położeniu każdego punktu w układzie x, y, z, zawierają informacje o intensywności odbicia widzialnej części promieniowania elektromagnetycznego, która pozwala na filtrację danych. Uzyskany obraz ukształtowania powierzchni terenu (DTM – *Digital Terrain Model*) jest utworzony z uwzględnieniem odfiltrowania informacji dotyczącej pokrycia terenu (DSM – *Digital Surface Model*).

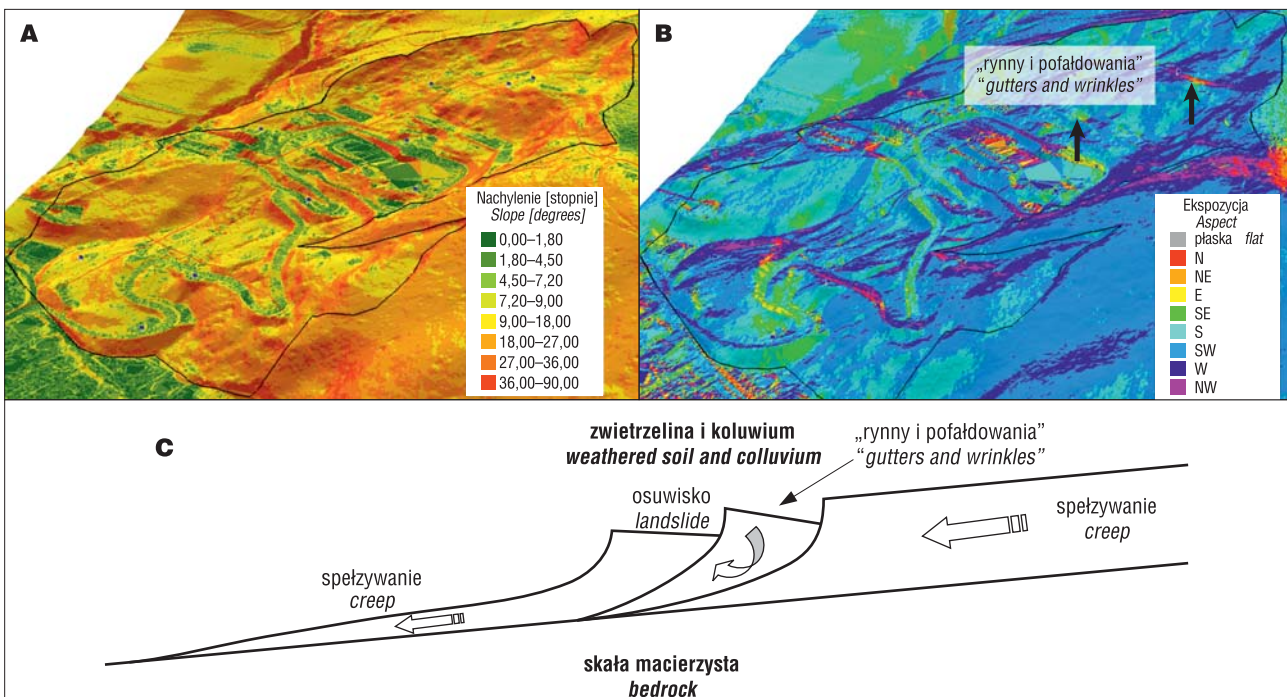
Analiza morfologii umożliwia szczegółowe zidentyfikowanie nachylenia skarp w modelu trójwymiarowym. Klasyfikację zmiennego nachylenia odwzorowuje skala barw, gdzie największe spadki ($>36^\circ$) zaznaczono kolorem



Ryc. 2. Przykładowy schemat budowy geologicznej
Fig. 2. Scheme of the geological structure



Ryc. 3. Zróżnicowanie struktury wewnętrznej zwietrzałego łupka ilastego uzyskane metodą mikrotomografii komputerowej: A – radiograf próbki po badaniu w aparacie trójosiowego ściskania; B – prostopadłe przekroje przedstawiające zmienność wewnętrzną próbki; C – ciągłość wyodrębnionych powierzchni łupliwości zidentyfikowanych podczas przetwarzania danych z mikrotomografu
Fig. 3. Example image of internal structure of weathered clay shale, obtained due to research with use of computed microtomography: A – Radiograph image of the sample after triaxial static testing; B – Perpendicular sections of sample's internal structure (white arrows show examples of cleavage surface); C – Continuity of cleavage planes identified during microtomography data processing



Ryc. 4. Numeryczny model terenu z: analizą spadków (A), ekspozycją stoków (B), schematem rozwoju deformacji powierzchniowych (C)
Fig. 4. Digital terrain model with: slope (A), aspect (B) scheme of surface deformation development (C)

czzerwonym, przechodząc dalej poprzez odcienie barwy żółtej aż do zielni, ze spadkami poniżej 9° (ryc. 4A). Interpretacja NMT pozwala także na uczytelnienie obrazu m.in. poprzez przedstawienie ekspozycji stoków oraz ich anomalii (ryc. 4B).

Analizując zgeneralizowany kierunek ekspozycji całego stoku, możemy w przypadku terenu osuwiskowego wyróżnić deformacje powierzchniowe w postaci rynien i zafałdowań, których odmienne nachylenia mogą być identyfikowane z wykorzystaniem NMT (ryc. 4C). Na podstawie uzyskanych obrazów można wnioskować o przestrzennym zróżnicowaniu aktywności osuwiskowej. Potwierdzają to niskie wartości wskaźników stateczności, ilustrujące tendencje do lokalnych przemieszczeń gruntów w postaci splezywania zwietrzliny po skale macierzystej oraz generowanych przez nie osuwisk konsekwentno-zwietrzelinowych (Gawriuczenkow i in., w druku).

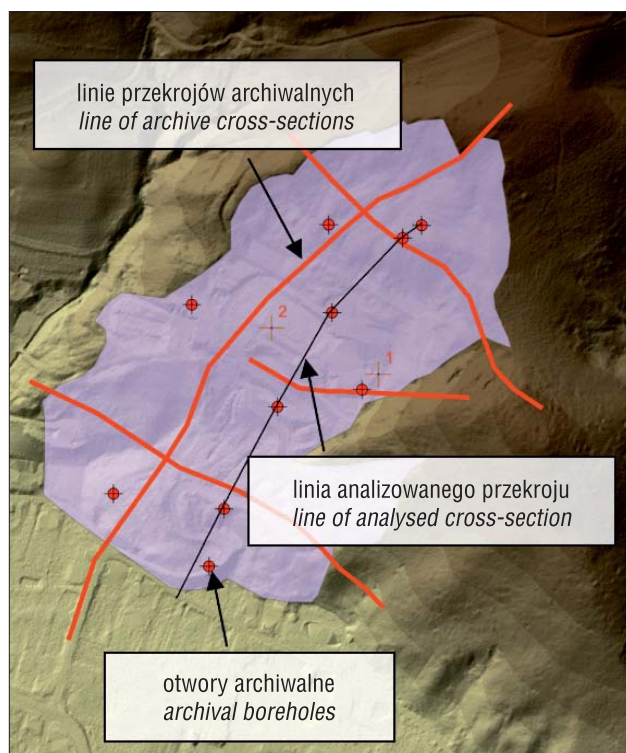
Finalnym etapem analizy numerycznego modelu terenu jest interpretacja zasięgu potencjalnych przemieszczeń (ryc. 5) oraz wyznaczenie linii przekroju obliczeniowego o największych nachyleniach wskazujących na zagrożenie dalszym rozwojem powierzchniowych ruchów masowych. Ustalenie lokalizacji linii przekroju na podstawie kompleksowej analizy numerycznego modelu terenu obejmuje zatem uwzględnienie spadków i kierunków ekspozycji w stosunku do spodziewanych wektorów przemieszczeń. Taka interpretacja NMT pozwala na bezpośrednią transpozycję danych wysokościowych z wybranego profilu podłużnego do geometrycznego modelu obliczeń numerycznych.

BADANIA WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNO-MECHANICZNYCH

Charakterystykę gruntów zwietrzelinowych i koluwialnych oraz skał, niezbędną dla zdefiniowania geomechanicznego modelu zbrocza, przyjęto na podstawie analizy doświadczeń uzyskanych podczas badań prowadzonych w laboratoriach: Instytutu Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej Uniwersytetu Warszawskiego, Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej oraz porównawczych danych z dokumentacji geologiczno-inżynierskich (Jaskólski i in., 2014; Kadłubowski i in., 2015) i atlasów właściwości geomechanicznych skał (Pinińska i in., 2004). Umożliwiają one krytyczną, wielowariantową ocenę zarówno identyfikacyjnych parametrów fizycznych gruntów, jak i kluczowych dla dalszych analiz właściwości mechanicznych: spójności i kąta tarcia wewnętrznego.

Wyniki badań składu granulometrycznego oraz podstawowych parametrów fizycznych zwietrzelin i koluwiów (tab. 1) odwzorowują ich znaczną zmienność. Jest ona uwarunkowana pierwotną, pionową strefowością profilu wietrzeniowego rozwiniętego w piaskowcach i łupkach oraz skutkami ciągłych, występujących z różną intensywnością, procesów geodynamicznych. W strefie przypowierzchniowej jest to przede wszystkim splezywanie zarówno w obrębie zwietrzelin, jak i starszych koluwiów.

W zespole zwietrzelin występują utwory o zawartości frakcji ilastej w przedziale 8–47,5%, reprezentujące zatem szeroki zestaw klasyfikacyjny gruntów – od mało spoistych (piaski gliniaste, pyły) do bardzo spoistych (iły). Konsekwencją tego jest znaczna zmienność wskaźnika plastyczności ($v \cong 0,3$), nieco mniejsza granicy płynności ($v \cong 0,22$) oraz granicy plastyczności ($v \cong 0,15$). Zmienność ta w



Ryc. 5. Numeryczny model przykładowego terenu z lokalizacją punktów wierceń (czerwone punkty), przekrojów badań geofizycznych (pomarańczowe linie) oraz zasięgiem osuwiska **Fig. 5.** Digital terrain model with the location of boreholes (red dots), ERT and seismic tomography profiles (orange lines) and landslide area

zwietrzelinach jest uwarunkowana przestrzennie. Z przeprowadzonych badań wynika, że wraz ze wzrostem głębokości wartości parametrów stanu maleją, co można częściowo wiązać ze zmniejszającym się w głąb profilu wietrzeniowego udziałem frakcji ilowej.

Znaczna część analizowanych próbek gruntów charakteryzowała się średnią zawartością frakcji ilowej rzędu 26%. Na podstawie nomogramu Casagrande'a wg Head (1992) można je głównie zaliczyć do gruntów o niskiej i średniej plastyczności, a na podstawie nomogramu van der Merwa do gruntów o potencjalnej ekspansywności – od niskiej do wysokiej (Gawriuczenkow i in., w druku). Uzyskane oceny znajdują potwierdzenie w badaniach pęcznienia swobodnego wg wskaźnikowej metody H.J. Gibbsa i W.G. Holtza (Head, 1992). Większość rozpatrywanych gruntów wykazuje niskie wartości pęcznienia swobodnego, nieprzekraczające 50%, co pozwala zaliczyć je do gruntów niepęczniejących. Cechy te potwierdzają rezultaty badań składu mineralnego, które wykazały, że dominującym minerałem ilastym jest illit ok 25%, pobocznie występuje beidelit 3% i kaolinit 3%. Dodatkowo w prawie wszystkich próbkach występują węglany – średnio 2%. W pojedynczych próbkach ich zawartość może dochodzić nawet do 12%, skupiając się przede wszystkim we frakcjach grubszych jako materiał spajający (ryc. 6). Ponadto we wszystkich zanotowano niewielkie domieszki substancji organicznej – poniżej 1%, związków żelaza: goethytu do 2% i syderytu do 1,5%.

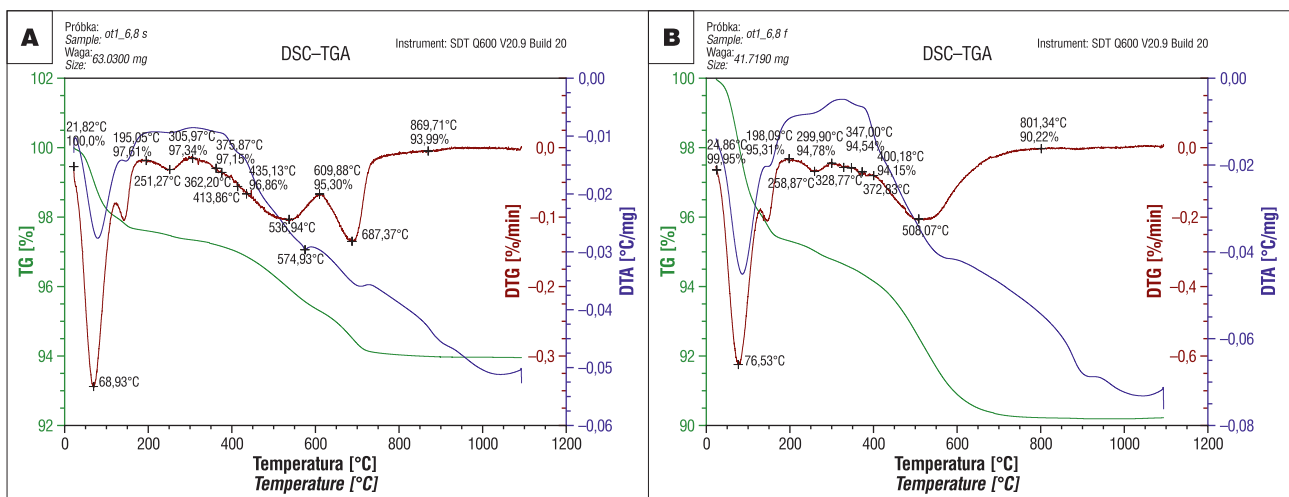
W przypadku zwietrzelin i koluwiów istotnym czynnikiem wpływającym na ich właściwości fizyczno-mechaniczne jest znacząca podatność na zmiany stanu, odnotowywane niekiedy kilkakrotnie w ciągu roku w

Tab. 1. Zmienność podstawowych fizycznych właściwości badanych gruntów zwietrzelinowych i koluwiów
Table 1. Variability of the basic physical properties of tested weathered soils and colluvium

Parametr Parameter	Gęstość właściwa szkieletu gruntowego Solid density ρ_s [Mg/m ³]	Gęstość objętościowa gruntu Wet/bulk density ρ [Mg/m ³]	Gęstość objętościowa szkieletu gruntowego Dry density ρ_d [Mg/m ³]	Wilgotność naturalna Water content w_n [%]	Granica plastyczności Plastic limit w_p [%]	Granica płynności Liquid limit w_L [%]	Wskaźnik plastyczności Plasticity index I_p [%]	Uziarnienie Grain size distribution [%]			
								>2 mm	2–0,05 mm	0,05–0,002 mm	<0,002 mm
\bar{x}	2,68	2,12	1,81	18,00	19,60	39,30	19,70	7,70	32,00	34,30	26,00
σ	0,06	0,14	0,22	8,06	2,92	8,64	6,19	11,65	17,44	12,31	10,54
min	2,39	1,90	1,42	1,40	13,60	20,20	6,50	0,00	0,80	11,60	8,00
max	2,76	2,45	2,26	33,90	24,70	54,30	30,90	45,90	74,90	57,00	47,50
v	0,02	0,06	0,12	0,45	0,15	0,22	0,31	1,52	0,54	0,36	0,40
n	53	36	36	53	35	36	35	36	36	36	36

\bar{x} – średnia arytmetyczna; σ – odchylenie standardowe; min , max – minimalna i maksymalna wartość parametru; v – współczynnik zmienności; n – liczba badań

\bar{x} – arithmetic mean; σ – standard deviation; min , max – minimum and maximum values; v – coefficient of variation; n – number of test



Ryc. 6. Przykładowe derywatogramy próbki surowej (A) i frakcji ilowej (B); DTA – krzywa termiczna różnicowa, DTG – termogravimetryczna krzywa różniczkowa, TG – krzywa termogravimetryczna

Fig. 6. Derivatogram of a sample (A) and its clay fraction (B) DTA – differential thermal curve DTG – derivative thermogravimetric curve, TG – thermogravimetric curve

nawiązaniu do cykli pogodowych. Stanowią one ważną cechę gruntów określaną niekiedy jako ich „przemienność”. Charakteryzuje się jednak ona także swoistą strefowością. Najwyższe wartości wilgotności dochodzące do 34% odnotowano w strefie do 4 m p.p.t, co określa zasięg oddziaływań pogodowych. Z kolei poniżej głębokości 16 m p.p.t wilgotność naturalna badanych gruntów nie przekracza 9% i rzutuje na większą wytrzymałość głębszych stref utworów koluwalnych oraz zwietrzelin. W efekcie w strefach tych będą występować zróżnicowane stany gruntów – od plastycznego do zwartego.

Gęstość objętościowa jest parametrem, który wykazuje stosunkowo małą zmienność w znacznym stopniu zależną od czynników metodycznych (Dobak, 1984). W gruntach zwietrzelinowych i koluwalnych odnotowano jednak znaczący wzrost gęstości objętościowej wraz z głębokością w granicach od 1,90 do 2,45 Mg/m³, co świadczy o rosnącym zagęszczeniu i wzrastającym udziale okruchów skalnych w profilu.





Wyniki badań właściwości fizycznych oraz składu mineralnego gruntu uzasadniają zmienność parametrów

wytrzymałościowych zależną od stanu gruntów, ale także od warunków utraty ciągłości materiału (ścianania, strefowej translacji).

Wytrzymałość τ była określana w aparacie trójosiowego ściskania oraz na wymuszonych powierzchniach w aparatach bezpośredniego ściskania: skrzynkowym, gdzie powierzchnia (strefa) zniszczenia jest uwarunkowana cechami strukturalnymi gruntu oraz stanem naprężenia. Tabela 2 przedstawia wyniki badań wytrzymałościowych. Z powodu znacznego zróżnicowania wyników i jakości próbek do obliczeń numerycznych przyjęto parametry wyprowadzone wg EC 7 (EN 1997-1) przedstawione w tabeli 3.

Zwietrzliny i koluwia charakteryzują się znaczną zmiennością zarówno parametrów fizycznych, jak i wytrzymałościowych, co wynika z cech litologiczno-strukturalnych litego podłoża, różnego stopnia zaawansowaniu procesu wietrzenia oraz redepozycji materiału wzdłuż zbocza. Zmienność ta ma znaczący wpływ na stabilność skarp, a w rutynowych analizach często nie jest dostatecznie uwzględniana. Stanowi to jedną z możliwych przyczyn rozbieżności pomiędzy wynikami prognoz obliczeniowych

Tab. 2. Parametry wytrzymałościowe badanych gruntów i skał (badania własne oraz wg Kadłubowskiego i in., 2015)
Table 2. Characteristic parameters of soil to define geotechnical layers (own research, Kadłubowski et al., 2015)

Numer warstwy Layer number	Rodzaj gruntu Soil type	Przykładowe zdjęcia materiału badawczego oraz głębokość pobrania próbek [m p.p.t.] Photo examples of research material and the sampling depth [m b.g.l.]	Ciężar objętościowy Bulk weight γ [kN/m ³]	Kąt tarcia wewnętrznego Internal friction angle ϕ' [°]		Spójność Cohesion c' [kPa]	
				Aparat trójosiowy TRI CU	Aparat skrzynkowy Shearbox	Aparat trójosiowy TRI CU	Aparat skrzynkowy Shearbox
I	zwietrzlina i koluwium weathered and colluvial soils	 ~6 m  ~9 m	$\bar{x} = 21,2$ $\sigma = 1,4$ min = 19,0 max = 24,5 n = 36	$\bar{x} = 22,71$ $\sigma = 4,83$ min = 14,5 max = 30,2 n = 7	$\bar{x} = 20,75$ $\sigma = 5,52$ min = 12,46 max = 29,25 n = 6	$\bar{x} = 12,43$ $\sigma = 3,29$ min = 6 max = 17 n = 7	$\bar{x} = 45,86$ $\sigma = 40,98$ min = 0,79 max = 107,70 n = 6
II	piaskowce sandstones	 ~17 m	24,5	15,0	30,0		
III	łupki shales	 ~12 m	22,6	20,0	48,0		

Tab. 3. Wartości wyprowadzone parametrów wg EC-7 przyjętych do analiz numerycznych

Table 3. Derived values of parameters according to EC-7 taken into numerical analysis

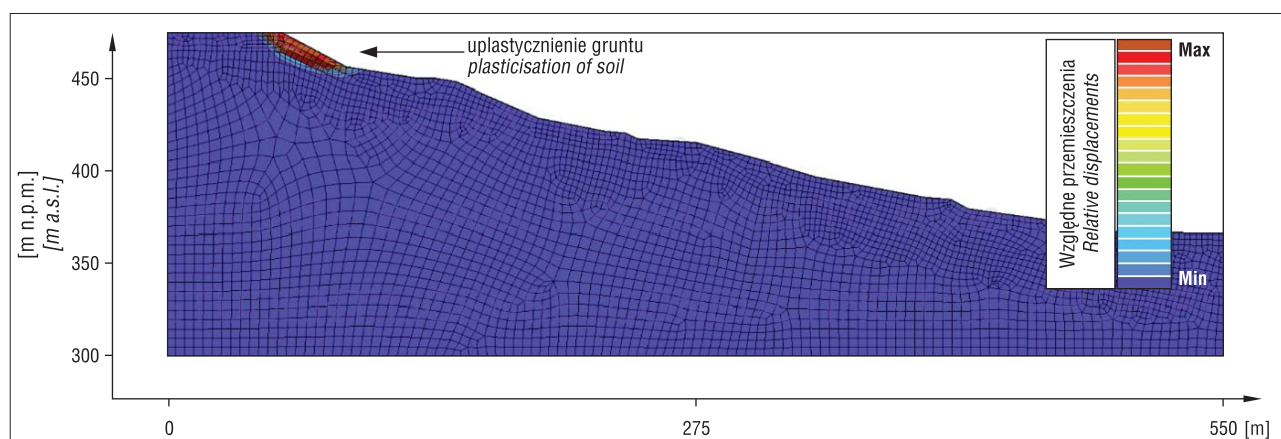
Nr warstwy Layer number	Rodzaj gruntu Soil type	Ciężar objętościowy Bulk weight γ [kN/m ³]	Kąt tarcia wewnętrznego Internal friction angle ϕ' [°]	Spójność Cohesion c' [kPa]
I	Zwietrzlina i koluwium Weathering soil and colluvium	$X_d = 19,2$	$X_d = 25,5$ Powierzchnie osłabienia Weakness surfaces $X_d = 19,1$	$X_d = 12,0$ Powierzchnie osłabienia Weakness surfaces $X_d = 12,0$
II	Piaskowce Sandstone	$X_d = 24,5$	$X_d = 15,0$	$X_d = 30,0$
III	Łupki Shale	$X_d = 22,6$	$X_d = 20,0$	$X_d = 48,0$

a obserwacjami geodynamicznymi. Zagadnienie to może być rozpatrywane np. poprzez zastosowanie opisu w postaci zbiorów rozmytych (Kaciewicz, 1985) lub też, jak w

niniejszym artykule, analizę wyników obliczeń stateczności zbocza przy opcjonalnych brzegowych warunkach materiałowych.

NUMERYCZNE MODELOWANIE WARUNKÓW STATECZNOŚCI

Zintegrowaną ocenę bezpieczeństwa zbocza w różnych warunkach brzegowych przeprowadzono wyznaczając wskaźnik stateczności SF (*Safety Factor*), gdzie $SF = 1$ określa stan równowagi chwiejnej. Wartość mniejsza niż jeden, świadczy o braku stateczności natomiast powyżej jedności wskazuje na zapas bezpieczeństwa. Wskaźnik stateczności wyznaczać można różnymi metodami, najczęściej iteracyjnymi prowadzącymi do określenia powierzchni najmniejszego oporu na przemieszczenie w warstwie gruntowej. Jedną z coraz częściej stosowanych obecnie procedur obliczeniowych jest metoda elementów skończonych (MES), której podstawowe ujęcie zaproponował Zienkiewicz (1972). W prowadzonych obli-



Ryc. 7. Wpływ geometrii zbocza na pole przemieszczeń – przy założeniu jednorodności fizyczno-mechanicznej ośrodka
Fig. 7. Slope geometry impact on the displacement field (homogeneity of the physical-mechanical material properties is assumed)

zeniach aplikowano krokową redukcję wartości parametrów wytrzymałościowych, czyli kąta tarcia wewnętrznego oraz kohezji (Zimmermann i in., 1987), przyjmując jednocześnie kryterium zniszczenia Coulomba-Mohra. Wynikiem obliczeń jest wyznaczenie wektorowego pola deformacji w punktach węzłowych siatki dyskretyzacyjnej. Najwyższe względne wartości wektora przemieszczeń wskazują na lokalizację potencjalnej strefy uplastycznienia gruntu. Jej kształt jest uzależniony od stanu naprężenia w węzłach siatki obliczeniowej, a także od układu i właściwości warstw geotechnicznych, a także przyjętych obciążeń – własnych masywu gruntowego oraz opcjonalnie zewnętrznych od obiektów i składowych dynamicznych.

Do przeprowadzenia obliczeń wykorzystano program numeryczny *Z_soil v14.10*. Przedstawiane wyniki analiz numerycznych były ukierunkowane przede wszystkim na spodziewane przemieszczenia zwierzchni i koluwiów. Analizowano także warunki całkowitej stateczności w nawiązaniu do modelowego poszukiwania możliwych, głębiej położonych stref przemieszczeń (hipotetycznych powierzchni poślizgu). W MES wyznaczanie potencjalnych stref przemieszczeń jest warunkowane analizą stanu naprężenia oraz przyjętych materiałowych związków konstytutywnych. W efekcie określenie prawdopodobnej strefy przemieszczeń może być podstawą dla projektowania uzupełniających prac wiertniczych oraz lokalizowania systemu monitoringu wgłębnego. Wieloetapowa metodologia analizy stanu równowagi może obejmować różne zakresy przestrzenne – całego zbocza oraz lokalnych fragmentów, np. o wysokości 50 m i długościach 140–280 m. Takie podejście pozwala na uwzględnienie w modelach „lokalnych” MES większej liczby warstw, zagęszczenie siatki dyskretyzacji i uszczegółowienie przebiegu odtwarzania potencjalnej powierzchni poślizgu. Na podstawie otrzymanych wyników określono globalny aktualny wskaźnik stateczności na poziomie $SF_G = 1,33$, natomiast najmniejszy lokalny wskaźnik stateczności wynosi $SF_L = 1,10$ (Gawriuczenkow i in., w druku). Świadczy to o możliwości niezależnego uruchamiania powierzchniowych ruchów masowych w różnych częściach stoku, a efekty tego mogą rzutować na zmianę warunków stateczności całego zbocza.

Przedstawiana w niniejszym artykule analiza numeryczna stanowi kontynuację ocen zachowania zbocza przy różnych warunkach brzegowych. Obejmuje ona cztery etapy.

1. Określenie lokalizacji obszaru najbardziej predysponowanego do utraty stateczności ze względu na geometrię skarpy oraz wpływ obciążenia statycznego.

2. Obliczenia wskaźnika stateczności, z wykorzystaniem zaawansowanego modelu konstytutywnego *multilaminat* w obrębie zwierzchni i koluwiów.

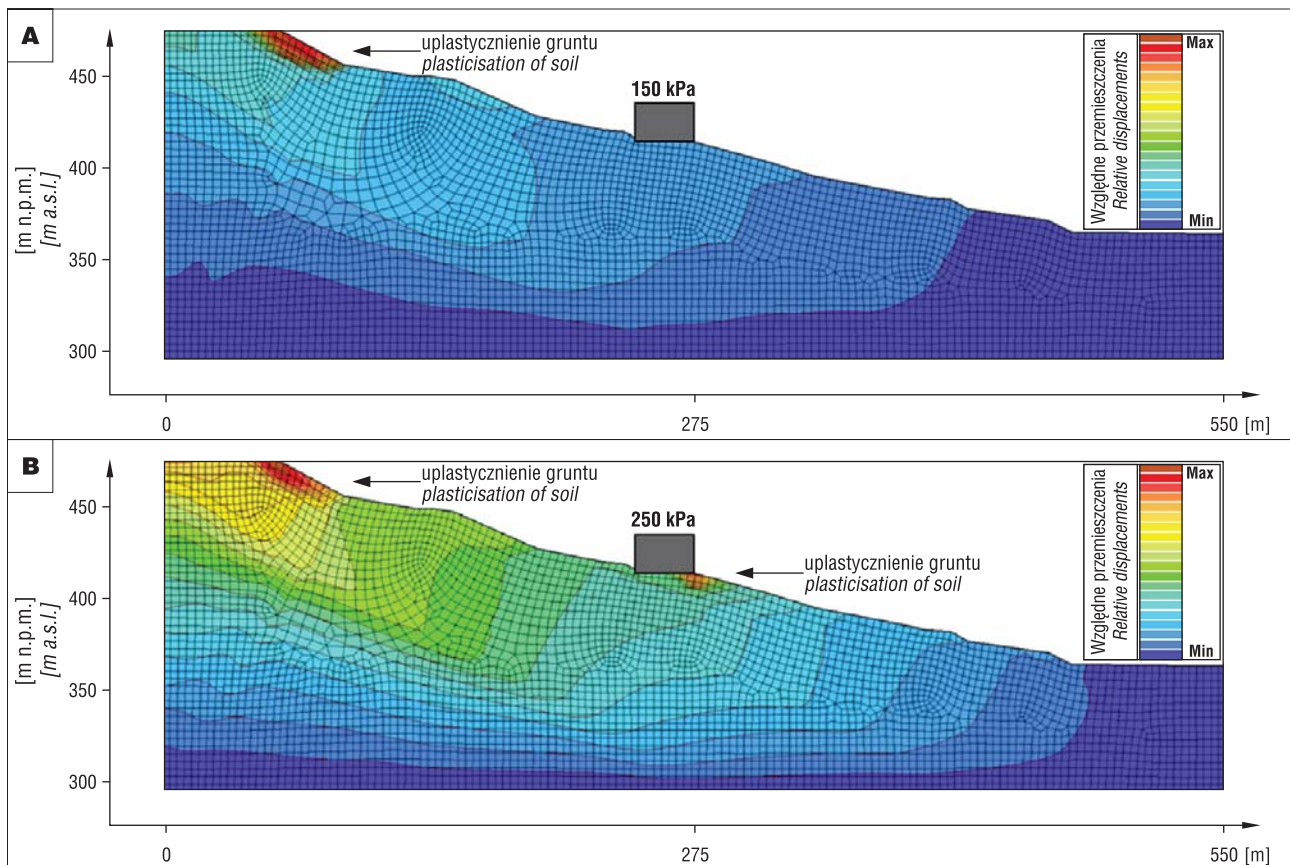
3. Analizy stateczności przy przyjmowanych różnych alternatywnych parametrach zwierzchniowej warstwy gruntu na skale macierzystej.

4. Obliczeniową weryfikację prawdopodobieństwa lokalizacji uprzywilejowanej powierzchni poślizgu w nawiązaniu do relacji kierunków strukturalnych oraz historycznych powierzchni poślizgu uzyskiwanych z rdzeni wiertniczych.

Pierwszy etap analizy numerycznej został zrealizowany poprzez obliczenia stateczności przy założeniu jednorodnego pod względem fizyczno-wytrzymałościowym ośrodka. Dla całego zbocza przyjęto parametry takie jak dla zwierzchni oraz koluwiów, żeby określić potencjalnie największy zasięg strefy przemieszczeń, nieograniczony wzmocnieniem wynikającym ze znacząco większej wytrzymałości podłoża skalnego. Warunki geometryczne zostały zdefiniowane bezpośrednio na podstawie NMT. Rycina 7 przedstawia przebieg stref największych względnych przemieszczeń w warunkach bez obiektu budowlanego. Wskazują one jednoznacznie, że potencjalnych zagrożeń uruchomienia osuwiska i/lub spłyzywania można się spodziewać w nawiązaniu do nachyleń stoku.

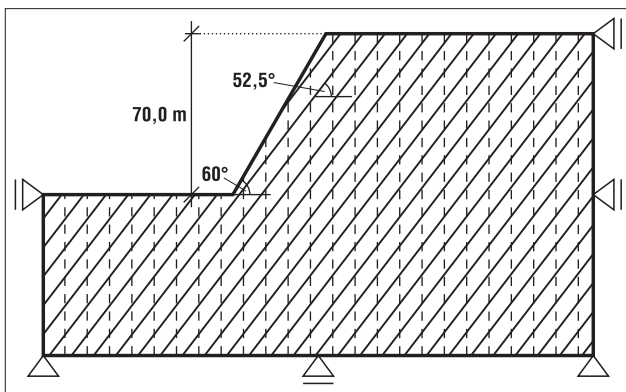
Po przeprowadzeniu tych obliczeń wykonano symulacje uwzględniające wpływ obiektu budowlanego przy dwóch alternatywnych obciążeniach. Rycina 8 przedstawia wyniki uwzględnienia obciążenia w środkowej części skłonu skarpy. Przy naprężeniu od obiektu 150 kPa nie ma istotnych efektów uplastycznienia. Natomiast zewnętrzne przyłożone naprężenie 250 kPa powoduje powstanie widocznych stref uplastycznienia oraz dodatkowo punktowego uplastycznienia gruntu przy krawędzi obiektu budowlanego, co może prowadzić do inicjacji procesu wypierania, w EC7 określonego jako stan utraty nośności granicznej GEO.

W drugim etapie przeprowadzonych obliczeń numerycznych określono wskaźnik stateczności całego zbocza z uwzględnieniem wpływu naturalnych powierzchni osłabienia w zwierzchni i koluwiach. Uprzywilejowany kierunek zniszczenia może wynikać nie tylko z uwarunkowań strukturalnych, ale także w znaczącym stopniu z udziału czynników wietrzeniowych. Został on wyrażony odpowiednio redukcją parametrów wytrzymałościowych. W modelu numerycznym powierzchni osłabienia nawiązujące do anizotropii wynikającej z wietrzenia profilu zostały zasy-



Ryc. 8. Wpływ obciążenia na pole przemieszczeń – przy założeniu jednorodności fizyczno-mechanicznej ośrodka: **A** – obciążenie wywołujące naprężenia o wartości 150 kPa; **B** – obciążenie wywołujące naprężenia o wartości 250 kPa

Fig. 8. Numerical analysis of the loading impact on the displacement surface shape: **A** – load of 150 kPa; **B** – load of 250 kPa



Ryc. 9. Schemat warunków brzegowych ośrodka z uwzględnieniem płaszczyzn osłabienia, w materiałowym modelu *multilaminat* (Commend i in., 2014)

Fig. 9. Scheme of material boundary conditions with regard to weakness planes in the *multilaminat* material model (Commend et al., 2014)

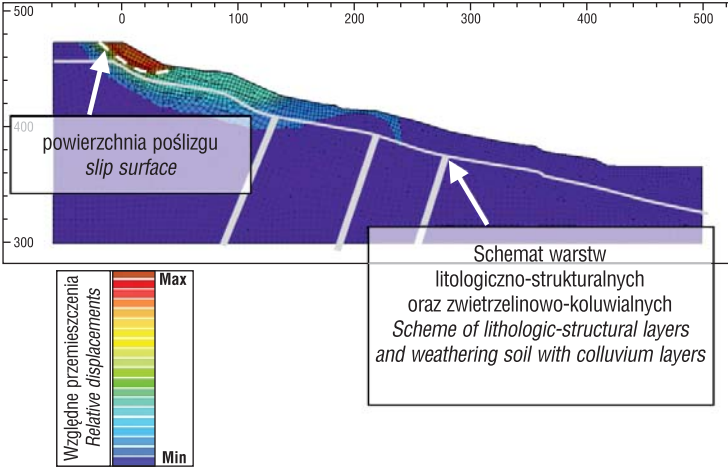
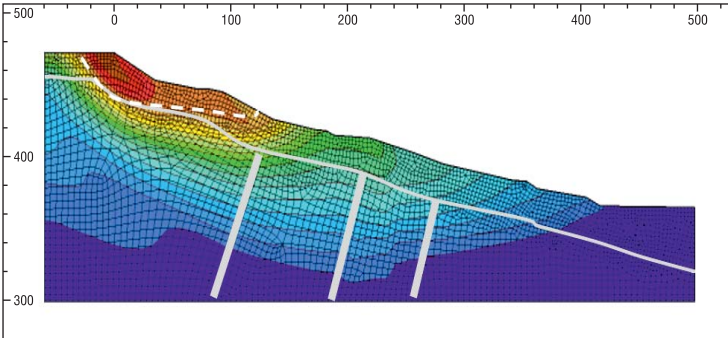
mulowane poprzez wykorzystanie rozwiązań modelu *multilaminat* (Commend i in., 2014). W modelu tym można definiować parametry wytrzymałościowe w różnych płaszczyznach, co zostało schematycznie przedstawione na rycinie 9 w postaci warunków brzegowych układu statycznego. Definiowanie zmiennych parametrów uzyskuje się na drodze wprowadzenia płaszczyzn charakterystycznych dla danego materiału z obniżonymi wartościami parametrów wytrzymałościowych. Skutkuje to powstaniem przemieszczeń wzdłuż tak uprzywilejowanych powierzchni. W modelu tym wykorzystano założenia kryterium zniszczenia Menétrey-Willam (Menétrey & Willam, 1995). Dla

porównania warto przytoczyć model izotropowy, który zakłada brak zmienności parametrów w badanym materiale. Model *multilaminat* został zaimplementowany do warstw zwietrzelin i koluwiów jako powierzchnie osłabienia o nachyleniu 20°.

Uzyskana z obliczeń wartość wskaźnika stateczności dla całej skarpy, z uwzględnieniem modelu *multilaminat*, wyniosła $SF_G = 1,2$ i była o 0,13 niższa w stosunku do obliczeń z wykorzystaniem modelu izotropowego. Jak widać „zapasy” bezpieczeństwa są w znaczącym stopniu zależne od przyjmowanej kombinacji parametrów wytrzymałościowych. W przypadku ich zmian, np. na skutek uplastycznienia powodowanego okresowymi opadami, wyznaczony margines bezpieczeństwa wydaje się niezbyt duży, co wskazuje na potrzebę prowadzenia bieżącego monitoringu zachowań zbrocza.

W trzecim etapie obliczeń numerycznych przeprowadzono symulacje zmian parametrów wytrzymałościowych warstwy zwietrzelinowej i koluwiów, które są najbardziej zróżnicowane, jak również wrażliwe na zmiany spowodowane warunkami atmosferycznymi. Zmienność parametrów wytrzymałościowych jest odzwierciedleniem sygnalizowanego wcześniej wpływu zróżnicowania składu mineralogicznego frakcji ilastej. W tabeli 4 zestawiono wyniki analizy parametrycznej prowadzonej dwiema ścieżkami. Pierwszą, w której zmieniano kąt tarcia wewnętrzznego w zakresie 20,6–30,6° z krokiem obliczeniowym co 1°. W drugiej ścieżce obliczeniowej kąt tarcia wewnętrzznego był na stałym poziomie ($\varphi = 25,6^\circ$), natomiast spójność ulegała zmianie od 8 kPa do 14 kPa z krokiem zmiany co 1 kPa. Zależność współczynnika SF od zmian parametrów

Tab. 4. Wyniki obliczeń numerycznych stateczności zbocza z uwzględnieniem różnych parametrów wytrzymałościowych zwietrzelin i kolumium**Table. 4.** The results of slope stability numerical calculations taking into account various strength parameters of weathering soil and colluvium

Konfiguracja parametrów wytrzymałościowych warstwy zwietrzelinowej <i>Strength parameters configuration of weathering soil layer</i>		Przykładowy typowy obraz powierzchni poślizgu * <i>Example of a typical image of potential slip surface *</i>
<p>Wynik obliczeń stateczności z uwzględnieniem wartości kąta tarcia wewnętrznego $\varphi = 25,6^\circ$ oraz zmianie wartości kohezji 8 kPa–10 kPa (z krokiem zmiany $\Delta c = 1$ kPa): SF = 1,30–1,32*</p> <p><i>The calculation result of the slope stability, taking into account the internal friction angle $\varphi = 25.6^\circ$ and cohesion change range 8 kPa–10 kPa (with a step change $\Delta c = 1$ kPa): SF = 1.30–1.32*</i></p>	<p>Wynik obliczeń stateczności z uwzględnieniem wartości kohezji $c = 12$ kPa oraz złożonych zmian wartości kąta tarcia wewnętrznego $20,6^\circ$–$23,6^\circ$ (z krokiem zmiany $\Delta\varphi = 1^\circ$): SF = 1,21–1,30*</p> <p><i>The calculation result of the slope stability, taking into account the cohesion $c = 12$ kPa and internal friction change range 20.6°–23.6° (with a step change $\Delta\varphi = 1^\circ$): SF = 1.21–1.30*</i></p>	
<p>Wynik obliczeń stateczności z uwzględnieniem wartości kąta tarcia wewnętrznego $\varphi = 25,6^\circ$ oraz zmianie wartości kohezji 11 kPa–14 kPa (z krokiem zmiany $\Delta c = 1$ kPa): SF = 1,32–1,33*</p> <p><i>The calculation result of the slope stability, taking into account the internal friction angle $\varphi = 25.6^\circ$ and cohesion change range 11 kPa–14 kPa (with a step change $\Delta c = 1$ kPa): SF = 1.32–1.33*</i></p>	<p>Wynik obliczeń stateczności z uwzględnieniem wartości kohezji $c = 12$ kPa oraz założonych zmian wartości kąta tarcia wewnętrznego $24,6^\circ$–$30,6^\circ$ (z krokiem zmiany $\Delta\varphi = 1^\circ$): SF = 1,32–1,36*</p> <p><i>The calculation result of the slope stability, taking into account the cohesion $c = 12$ kPa and internal friction change range 24.6°–30.6° (with a step change $\Delta\varphi = 1^\circ$): SF = 1.32–1.36*</i></p>	

* Kształt powierzchni poślizgu jest różny dla poszczególnych analiz. W niektórych przypadkach kształt tej powierzchni różni się nieznacznie, natomiast w niektórych zmiany są łatwo dostrzegalne. Należy zaznaczyć, że każda zmiana powierzchni poślizgu ma konsekwencje w uzyskanych wynikach wskaźnika stateczności. Z tego powodu może nastąpić sytuacja, w której wskaźnik stateczności jest zbliżony, natomiast powierzchnia poślizgu jest różna (tak jak to ma miejsce, w przypadku zmiany spójności).

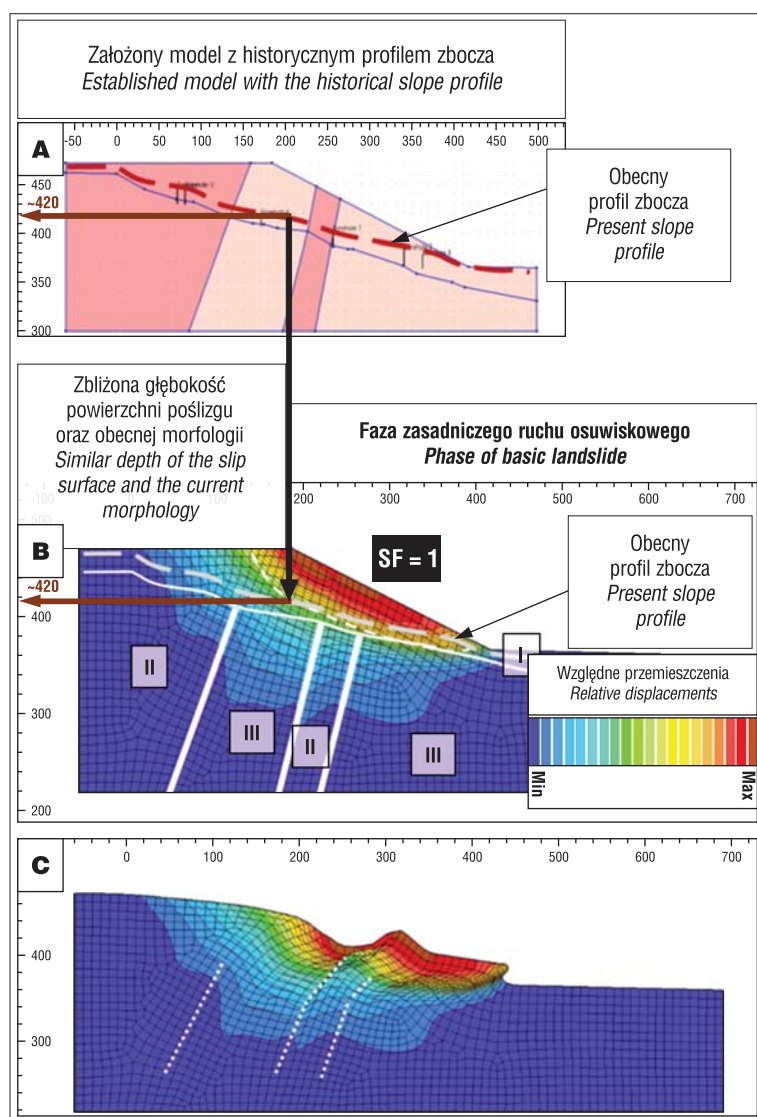
The shape of the slip surface is different each time, according to various strength parameters. In some cases the slip surface is slightly different, and in other cases the change of this surface is clearly visible. Furthermore, the change of slip surface can result in similar Safety Factor, which is observed in case of cohesion parameter change.

wytrzymałościowych jest w przybliżeniu liniowa. Na podstawie otrzymanych wyników można ocenić wrażliwość wskaźnika stateczności na zmiany parametrów materiałowych. Otrzymane wyniki wykazały także wpływ przyjętych parametrów wytrzymałościowych na kształtowanie się i zasięg stref deformacji w zboczu.

Należy podkreślić duże prawdopodobieństwo występowania śpływania na kontakcie zwietrzliny i kolumium ze skałą macierzystą. Grunty zwietrzelinowe i kolumialne z dużym udziałem frakcji ilowej, jak również bez wcześniejszego obciążenia nie wykazują cech wzmocnienia strukturalnego, co w konsekwencji powoduje znaczące przemieszczenie i wzrost potencjalnych prędkości odkształceniowych (Kempfert & Gebreselassie, 2006).

W czwartym etapie obliczeń numerycznych przeprowadzono analizy stateczności zbocza w nawiązaniu do prawdopodobnych w przeszłości zmian jego nachylenia

i zasięgu. Prezentowane w literaturze klasyczne poglądy na temat rozwoju stoku wskazują rozmaite scenariusze, które powstały na podstawie założeń m.in. Davisa i Pencka (Klimaszewski, 1994). Są one zależne zarówno od budowy podłoża, jak i uwarunkowań klimatycznych. W nawiązaniu do bardziej szczegółowych modeli (np. Lawsona *vide* Klimaszewski, 1994) przyjęto, że początkowy kształt profilu zbocza (ryc. 10A) został określony poprzez przedłużenie górnej krawędzi korony osuwiska i jej przecięcie z linią o największym obserwowanym w dolnej części zbocza spadku, którą poprowadzono od podnóża ku górze. Zakłada się, że przy takim hipotetycznym nachyleniu skarpa jest w stanie równowagi granicznej ($SF \leq 1$) co inicjuje dalszy rozwój zbocza (ryc. 10B). Dalsza analiza stateczności zbocza pozwala na odtwarzanie historycznych powierzchni znaczących deformacji korelujących się z profilem równowagi zbocza.



Ryc. 10. Wyniki numerycznego modelowania hipotetycznego rozwoju zbocza: przyjęcie historycznej morfologii terenu (A), pole przemieszczeń założonego zbocza (B), przeskalowane deformacje obliczeniowej siatki elementów skończonych (C)

Fig. 10. Numerical back analysis for estimation of potential basic landslide: assumption of historical terrain morphology (A), displacement field of established slope (B), resized deformation of finite element mesh (C)

Na rycinie 10C przedstawiono zabieg przeskalowania siatki obliczeniowej, co podkreśla dwudzielność stref przemieszczeń w całym zboczu, która wynika ze zróżnicowania litologicznego podłoża skalnego (wychodnie piaskowców i łupków). Warto więc zauważyć, że symulacja rozwoju ruchu osuwiskowego obszaru o budowie fliuszowej może prowadzić do *quasi*-blokowego mechanizmu wewnętrznych przemieszczeń, w nawiązaniu do strukturalnego modelu zbocza.

Podsumowując ostatni etap obliczeń numerycznych, należy wskazać na potrzebę rozpatrywania także opcji występowania głębszej historycznej powierzchni poślizgu związanej z wczesnymi etapami kształtowania założonej rzeźby. Wymaga to przyjęcia odpowiednich parametrów materiałowych, które uwzględnią ewentualnie osłabienia wytrzymałości na takich powierzchniach. W modelu numerycznym istnieje możliwość ich uwzględnienia poprzez zdefiniowanie elementów typu *interface* o zredukowanych parametrach wytrzymałościowych.

Ta ścieżka modelowania numerycznego może być wykorzystywana przy projektowaniu wierceń obejmujących głębsze strefy podłoża skalnego, w szczególności na granicy zmian litologii, które mogą potwierdzić tezy o występowaniu głębokich powierzchni poślizgu.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

1. Przeprowadzone analizy numeryczne pozwalają na ilościową symulację warunków powstawania powierzchniowych ruchów masowych konsekwentno-zwierzelinowych, które rozwijają się na obsekwentnym układzie warstw podłoża skalnego. Należy zaznaczyć, że osuwiska te mogą być inicjowane poprzez speływanie gruntu, ale te same osuwiska mogą podlegać pełzaniu w dolnych częściach. Sytuacje takie są powszechne i charakterystyczne na kontaktach gruntów zwierzelinowych i starszych koluwiów ze skałami macierzystymi. Zaprezentowana metodyka modelowania może być pomocna przy prognozowaniu tego typu zagrożeń geodynamicznych.

2. Najistotniejszym czynnikiem w prognozowaniu stateczności zboczy jest uwzględnienie przemienności właściwości fizyczno-mechanicznych gruntów. Progностyczne symulacje obliczeniowe należy prowadzić, uwzględniając stan uplastycznienia gruntów w okresach największej wilgotności podłoża. Jednocześnie znaczny udział frakcji ilastej w gruntach powoduje uszczelnienie podłoża i znacząco zmniejsza wrażliwość na czynniki atmosferyczne. Z badań laboratoryjnych wynika, że do 4 m p.p.t. obserwuje się znaczne oddziaływania czynników pogodowych. Strefa od 4 do 16 m może być traktowana jako przejściowa, a poniżej 16 m p.p.t. nie obserwuje się zmian wilgotności w przypadku występowania osadów wietrzeniowo-koluwalnych.

3. Wyniki przeprowadzonych obliczeń wskazują, że obecność stref osłabień w zwierzelinach i koluwiach (uplastycznione grunty spoiste) redukuje wartości wskaźnika stateczności o ok. 10% w przypadku przemieszczeń występujących *quasi*-równoległe do granicy skały macierzystej i zwierzeliny lub powierzchni zbocza.

4. Przeprowadzone opcjonalne modelowania pokazują możliwość realizacji analiz ukierunkowanych na odtwarzanie złożonych cykli przebiegu procesów i ocenę alternatywnych hipotez. Niezbędna jest tu pogłębiona analiza strukturalna oraz odpowiedni dobór parametrów wytrzymałościowych, które będą nawiązywały do dokumentowanego w badaniach laboratoryjnych złożonego obrazu powierzchni osłabień o genezie strukturalno-tektonicznej oraz egzogenicznej (wietrzeniowej).

5. Zastosowanie przedstawionej metodyki analiz i obliczeń dla prognozowania wpływu głęboko zlokalizowanych powierzchni poślizgu na uaktywnienie osuwisk o charakterze rotacyjno-translacyjnym wymaga głębszej prospekcji zarówno wiertniczej, geofizycznej, jak i pozyskania próbek do badań laboratoryjnych z udokumentowanych powierzchni poślizgu. Program badań geomechanicznych musi w tym przypadku nawiązywać do analizy stanu naprężenia oraz

modelowania adekwatnych wymuszeń (np. wstrząsów parasejsmicznych).

6. Ważnym elementem modelowania zachowań zbrocza jest numeryczny model terenu umożliwiający uwzględnienie lokalnych zmian spadków oraz ich ekspozycji ujawniających litologiczno-strukturalne cechy podłoża, a także charakter i zaawansowanie rozwoju zbrocza.

7. W określeniu zmienności strukturalnej materiału gruntowego jest przydatna wysokorozdzielcza mikrotomografia komputerowa, która stanowi nowoczesną i nieszkodliwą metodę badawczą. Uzyskane dane pozwalają na bardziej adekwatnie odtwarzanie warunków fizycznych przez numeryczny model obliczeniowy.

Część badań została zrealizowana w ramach projektu BST 170203 finansowanego z środków prac statutowych WG UW.

LITERATURA

- BARAŃSKI M., POPIELSKI P., SZCZEPAŃSKI T., & WRONA M. 2007 – Analiza możliwości weryfikacji modelu numerycznego na podstawie pomiarów i badań wykonanych w trakcie realizacji obiektu. *Czasopismo Techniczne*, 104 (1): 3–16.
- BEDNARCZYK Z. 2007 – Badania geologiczno-inżynierskie karpaczkich osuwisk fliszowych w rejonie Gorlic (Beski Niski). *Geologos*, 11: 333–345.
- BOGUSZ W. & WITOWSKI M. 2015 – Walidacja modelu Hardening Soil Small w badaniach trójosiowych gruntu z zastosowaniem czujników napróbkowych. *Inżynieria Morska i Góotechnika*, 36 (3): 262–266.
- CZARNECKI L., JOŃCZYK W., ORGANIŚCIAK B. & WYSOKIŃSKI L. 2007 – Zagrożenia geotechniczne w wyrobisku górniczym kopalni Bełchatów. ITB, Warszawa.
- COMMEND S., TRUTY A. & ZIMMERMANN TH. 2014 – Numerical simulation of failure in elastoplastic layered media: theory and applications. *Zsoil.PC 070404 report*. Zace Services Ltd., Lausanne.
- CHOWANIEC J., WÓJCIK A., MROZEK T., RAĆKOWSKI W., NESCIERUK P., PERSKI Z., WOJCIECHOWSKI T., MARCINIEC P., ZIMNAL Z. & GRANOSZEWSKI W. 2012 – Osuwiska w województwie małopolskim. Atlas-Przewodnik. Kraków: Departament Środowiska, Rolnictwa i Geodezji Urzędu Marszałkowskiego Województwa Małopolskiego.
- DOBAK P. 1984 – Problemy oceny jednorodności ośrodka gruntowego na podstawie zmienności wybranych parametrów geotechnicznych. *Pr. Nauk. Inst. Geotech. PWroc.*, 44 (17): 23–30.
- EN 1997-1: 2004 Eurocode 7. Geotechnical design. Part 1. General rules. GAWRUCZENKOW I., KACZMAREK Ł., KIELBASIŃSKI K., KOWALCZYK S., MIESZKOWSKI R. & WÓJCIK E. – Stateczność skarpy i zagrożenia osuwiskowe w świetle kompleksowych badań geologicznych. *Prz. Nauk. Inż. i Kształt. Środ.* (w druku).
- HEAD K.H. 1992 – *Manual of Soil Laboratory Testing*, Vol. 1: Soil classification and compaction tests. Pentech Press, London.
- JASKÓLSKI Z., KOS J., FORYŚ M., SZYMONIK L. & BAKAJ M. 2013 – Dokumentacja geologiczno-inżynierska dla zadania pn.: „Stabilizacja osuwiska wraz z remontem drogi – działka nr 174/1 – w miejscowości Chełm w km 2+740 – 2+940” Q-5554. Przedsiębiorstwo Geologiczne S.A., Kraków.
- KACEWICZ M. 1985 – Zastosowanie teorii zbiorów rozmytych do badań inżyniersko-geologicznych na przykładzie obliczeń stateczności zbroczy. Praca doktorska. Biblioteka WG UW, Warszawa.
- KACZMAREK Ł. & DOBAK P. 2015 – Stability conditions of the Vistula Valley attained by a multivariate approach – a case study from the Warsaw Southern Ring Road. *Geologos* 21 (4): 249–260.
- KACZYŃSKI R., BAĆKOWSKA A. & KIELBASIŃSKI K. 2010 – Analiza stateczności zbrocza w rejonie kościoła św. Katarzyny w Warszawie z uwzględnieniem obciążeń dynamicznych. *Acta Scientiarum Polonorum – Architektura*, 7 (1): 27–38.
- KADŁUBOWSKI A., MIESZKOWSKI R., FOLTYN P. & OZIMKOWSKI W. 2015 – Dokumentacja geologiczno-inżynierska dotycząca określenia warunków geologiczno-inżynierskich dla możliwości stabilizacji osuwiska nr 12-15-064 89 w Makowie Podhalańskim, powiat Suski, woj. Małopolskie. Częstochowa: P.P.H.U. Guard.
- KASPRZAK A., BARTNIK E. & POPIELSKI P. 2015 – Wpływ temperatury i obciążenia wodą na przemieszczenia i naprężenia wybranych sekcji zapory betonowej w Rożnowie. 333-344. [W:] J. Winter & A. Wita (red.), *Eksploatacja budowli piętrzących – diagnostyka i zapobieganie zagrożeniom*. IMiGW-PIB, Warszawa.
- KEMPFERT H.G. & GEBRESELASSIE B. 2006 – *Excavations and Foundations in Soft Soils*. Berlin: Springer.
- KLIMASZEWSKI M. 1994 – *Geomorfologia*. PWN, Warszawa.
- KODA E. & OSIŃSKI P. 2015. – Application of alternative methods of slope stability improvement on landfills. *Proceedings of the XVI ECSMGE Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development in Edinburgh 13th–17th September 2015*. [W:] M.G. Winter, D.M. Smith, P.J.L. Eldred, D.G. Tol – *Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development: XVI European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- MENÉTREY PH. & WILLAM K.J. 1995 – A triaxial failure criterion for concrete and its generalization. *ACI Structural Journal*, 92 (1): 311–318.
- PINIŃSKA J. (red.) 2004 – *Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał Część IV Karpaty fliszowe* Objaśnienia i interpretacja. Wyd. Geol. UW, Warszawa.
- ZIENKIEWICZ O. 1972 – *Metoda Elementów Skończonych*. Arkady, Warszawa.
- ZIMMERMANN TH., RODRIGUEZ C. & DENDROU B. 1987 – Z_SOIL.PC: A program for solving soil mechanics problems on a personal computer using plasticity theory. *Int. Conf. on Geomechanics*, Innsbruck, Balkema.