

Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska (2017), 26 (1), 85–98
Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. (2017), 26 (1)
Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences (2017), 26 (1), 85–98
Sci. Rev. Eng. Env. Sci. (2017), 26 (1)
<http://iks.pn.sggw.pl>
DOI 10.22630/PNIKS.2017.26.1.08

**Ireneusz GAWRIUCZENKOW, Łukasz KACZMAREK,
Kamil KIEŁBASIŃSKI, Sebastian KOWALCZYK,
Radosław MIESZKOWSKI, Emilia WÓJCIK**

Institut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, Uniwersytet Warszawski
Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, University of Warsaw

Stateczność zbocza i zagrożenie osuwiskowe w świetle kompleksowych badań geologicznych

Slope stability and failure hazards in the light of complex geological surveys

Słowa kluczowe: analiza stateczności, metody geofizyczne, laboratoryjne techniki badawcze, metoda redukcji parametrów c - ϕ , południowa Polska

Key words: slope stability analysis, geophysical methods, laboratory testing of soil, c - ϕ reduction method, southern Poland

Wprowadzenie

Jednym z podstawowych elementów planowania i rozwoju przestrzennego jest wszechstronna analiza warunków naturalnych, między innymi: ukształtowania terenu, klimatu i warunków gruntowo-wodnych. Powierzchnie nachylone zazwyczaj stwarzają utrudnienia w zagospodarowaniu i wymagają specjalne-

go podejścia badawczego i projektowego. Zgodnie z aktualnymi wytycznymi dla budowli usytuowanych na zboczach czy skarpach, a także w ich sąsiedztwie zalecane jest przeprowadzenie oceny stateczności. W niniejszym artykule przedstawiono propozycję wielowątkowego podejścia do zagadnienia stateczności wybranego zespołu osuwiskowego zlokalizowanego w Polsce południowej i doboru parametrów do symulacji warunków stanu równowagi. Problematyka jest o tyle aktualna i istotna, że dotyczy wielu lokalizacji na terenie naszego kraju, a ponadto znajduje odzwierciedlenie w zmianach w ustawodawstwie w zakresie budownictwa na terenach osuwiskowych, ich sąsiedztwie oraz na terenach zagrożonych ruchami masowymi.

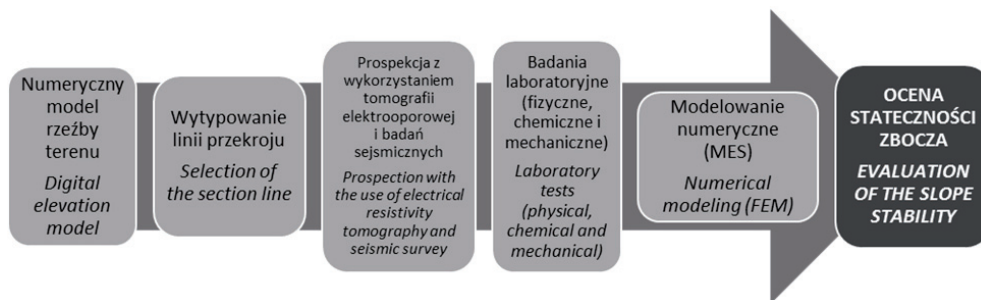
Material

Analizowany teren położony jest w południowej Polsce, w województwie małopolskim, gdzie często dochodzi do bardzo wielu powierzchniowych ruchów masowych, które są zróżnicowane (Chowaniec i inni, 2012). Zgodnie z rejonizacją tektoniczną obszar ten należy do płaszczowiny magurskiej, która jest najwyższą jednostką strukturalną Karpat zewnętrznych. Budują ją głównie osady fliszowe kredy górnej i paleogenu. Jako, że osuwisko tworzy wyraźną formę z dobrze czytelnymi granicami i dalej jest częściowo aktywne, a tym samym może powodować bezpośrednie zagrożenie dla życia ludzi, infrastruktury technicznej lub komunikacyjnej, wykonano wariantową analizę stateczności, postępując zgodnie ze schematem zamieszczonym na rysunku 1.

-tektoniczna (uskoki), postępujące wietrzenie skał podłoża, nachylenie stoków oraz nasycenie osadów stokowych infiltrującymi wodami opadowymi (Wójcik, 2013). Analizując archiwalne wiercenia, można stwierdzić, że zwierciadło warstwy przypowierzchniowej jest nieciągłe i znajduje się około 4,5 m p.p.t. w górnej części zbocza. U podnóża z kolei zwierciadło wody występuje na głębokości do około 13 m. Należy zaznaczyć, że są to wody płytkiego krążenia, na zboczu zaś dominuje powierzchniowy spływ, co potwierdza opracowanie Chowanieca i innych (1997), w którym można znaleźć informację o zaleganiu głównego poziomu wodonośnego na głębokości większej niż 50 m p.p.t. (bliżej niesprecyzowanej).

Badania geologiczno-inżynierskie

Specyfika budowy osuwisk w obszarach fliszowych wymaga dostosowania



RYSUNEK 1. Schemat podejścia metodologicznego dla oceny stateczności zbocza
FIGURE 1. Diagram of a methodological approach for the assessment of slope stability

Przedmiotowe osuwisko jest udokumentowane i zarejestrowane w bazie SOPO (system ochrony przeciwosuwiskowej) z nr 43958, ma kartę dokumentacyjną wraz z opinią. Zgodnie z nią osuwisko powstało w późnym holocenie, ma wieloetapowy przebieg, a przyczyną jego powstania jest budowa geologiczno-

odpowiedniej techniki badań do stopnia skomplikowania „warunków gruntowych” i budowy geologicznej. Występowanie w obrębie fliszu skał piaskowcowych, gruntów spoistych często w stanie miękkoplastycznym, różnego typu gruntów koluwalnych wymieszanych z fragmentami skał oraz rumoszu ogranicza

zastosowanie niektórych typów testów *in situ*. Program badań laboratoryjnych obejmuje z tego powodu nie tylko oznaczenia podstawowych parametrów fizycznych, ale przede wszystkim badania parametrów mechanicznych zróżnicowanych pod względem wytrzymałości materiałów przy założeniu uzyskania podczas wierceń jak najwyższej jakości próbek.

Dążąc do możliwie optymalnego rozpoznania właściwości ośrodka, które ma dostarczyć niezbędnych danych dla przeprowadzenia analizy stateczności, wykonano badania: wilgotności naturalnej, gęstości objętościowej gruntu, gęstości właściwej szkieletu gruntowego metodą piknometru gazowego AccuPyc 1330 (Micromeritics, USA), granicy płynności metodą penetrometru stożkowego oraz granicy plastyczności. Określono skład granulometryczny badanych gruntów za pomocą metod sitowej i areometrycznej, a także dla wybranych próbek wykonano oznaczenie składu mineralnego z zastosowaniem termicznej analizy różnicowej (DTA) z użyciem aparatu Q600 firmy TA Instrument według metodyki Kościówko i Wyrwickiego (1996). Ponadto zostały wykonane badania pęcznienia swobodnego. W zakresie badań wytrzymałościowych wykonano badania w aparacie skrzynkowym zgodnie z normą ISO/TS 17892-10:2004, określając parametry maksymalne i rezydualne, oraz badania typu CU (z konsolidacją izotropową, ścinanie w warunkach bez drenażu) w aparacie trójosiowym.

Badania geofizyczne

Wykorzystanie metod geofizycznych w kartowaniu osuwisk można znaleźć w wielu pracach na przy-

kład: Kaczmarek (2014); Kowalczyk i inni (2014); Dziewański i Pilecki (2002); Ostrowski i inni (2013). Na wybranym terenie wykonano rozpoznanie wglębne podłoża za pomocą metody tomografii elektrooporowej oraz techniką tomografii refrakcyjnej. Pomiar przeprowadzono wzdłuż jednego profilu wytyczonego zgodnie ze spadkiem zbocza. Badania geofizyczne wykonano w celu rozpoznania budowy geologicznej podłoża oraz określenia zasięgu i głębokości strefy poślizgu osuwiska.

Metoda tomografii elektrooporowej (ERT) została opracowana pod koniec XX wieku i szczegółowo jest opisana na przykład w pracach: Zhdanov i Keller (1994); Loke i Barker (1996); Mościcki i Antoniuk (1998); Samouelian inni (2005); Loke (2013a, b). Efektem zastosowania tej metody było uzyskanie rozkładu oporności elektrycznej podłoża, dzięki temu można było wydzielić granice litologiczne pomiędzy skałami piaszczystymi, formacją skał ilastych oraz koluwiami. W niniejszej pracy zastosowano układ pomiarowy typu gradient (zgodnie z Dahlin i Zhou, 2006). Pomiar wykonano aparaturą Terrameter LS szwedzkiej firmy ABEM. Szczegóły techniczne wykonanych pomiarów metod ERT zamieszczono w tabeli 1.

Badania sejsmiczne techniką tomografii refrakcyjnej

Metoda polega na zróżnicowaniu prędkości fali sejsmicznej w górotworze w zależności od jego parametrów sprężystych. Technika tomografii refrakcyjnej wykorzystuje czasy wstąpienia fal refrakcyjnych. Efektem prowadzonych

TABELA 1. Dane techniczne pomiarów metodą ERT
TABLE 1. Technical data of electrical resistivity tomography survey

Numer profilu pomiarowego Number of profile	Układ pomiarowy Applied array	Odległość między elektrodami The distance between electrodes [m]	Liczba elektrod The number of electrodes	Długość profilu Profile length [m]	Głębokość prospekcji [m p.p.t] Depth of investigation [m b.g.l.]	Prąd maksymalny Max current [mA]	Prąd minimalny Min current [mA]	Uwagi Comments
1	gradient	5	250	550	≈ 65	1500	10	uwzględniono poprawkę na ukształtowanie terenu topography correction was applied

TABELA 2. Dane techniczne pomiarów techniką tomografii refrakcyjnej
TABLE 2. Technical data of seismic refraction tomography survey

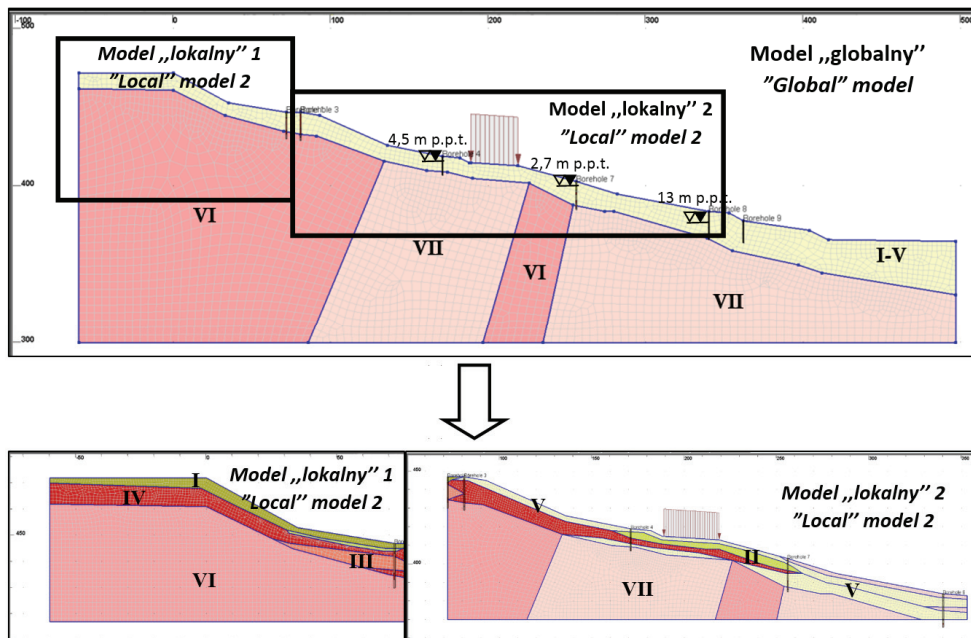
Numer profilu pomiarowego Number of profile	Geofony Geophones	Odległość między geofonami The distance between geophones [m]	Liczba geofonów The number of geophones	Długość profilu Profile length [m]	Sposób wzbudzenia fal sejsmicznych Seismic waves source	Głębokość prospekcji [m p.p.t] Depth of investigation [m b.g.l.]	Czas próbkowania A time increment [m.s ⁻¹]	Okno czasowe Time window [m.s ⁻¹]	Uwagi Comments
1	pionowe Vertical 28 Hz	5	250	550	młot 12 kg dragania wzbudzone co 5 m a heavy weight hammer (12 kg) to hit a base plate coupled to the ground from a distance of 5 m	≈ 40	1/8	100	uwzględniono poprawkę na ukształtowanie terenu topography correction was applied

pomiarów było określenie pola prędkości fali podłużnej w badanym ośrodku wzdłuż analizowanego profilu. W pomiarach zastosowano 24-kanalową aparaturę sejsmiczną Summit 24 niemieckiej firmy DMT. Szczegóły techniczne wykonanych pomiarów techniką tomografii refrakcyjnej zamieszczono w tabeli 2.

Obliczenia numeryczne

Elementem scalającym wszystkie przedstawione wcześniej badania są obliczenia numeryczne wskaźnika stateczności, które przy uwzględnieniu wielu otrzymanych parametrów podłoża umożliwiają ocenę i prognozę stateczności zbocza. W celu określenia wskaźnika stateczności (SF) zastosowano metodę elementów skończonych (Zienkiewicz,

1972) z wykorzystaniem metody redukcji parametrów wytrzymałościowych (inna zwyczajowa nazwa tej techniki to metoda $c-\phi$ redukcji; Zimmermann i inni (1987) oraz kryterium zniszczenia Coulomba–Mohra. Model numeryczny (rys. 2) został zdefiniowany z zastosowaniem numerycznego modelu terenu oraz badania geofizycznego skorelowanego z archiwalnymi wierceniami. Dokładność modelu budowy geologicznej, jak zostało to opisane w artykule Popielskiego i innych (2016), ma bardzo duży wpływ na wyniki obliczeń symulacji numerycznych. Z tego powodu stworzono trzy modele budowy geologicznej. Pierwszy z nich to model „globalny” o wysokości około 220 m, gdzie warstwa kilkudziesięciu metrów utworów czwar-



RYСУNEK 2. Analizowane numeryczne modele budowy geologicznej. Numery warstw są objaśnione w tabeli 3

FIGURE 2. The analyzed numerical models of the geological structure. The numbers of layers are explained in Table 3

torzędowych została zgeneralizowana do jednej warstwy zwietrzelinowej dla usprawnienia obliczeń numerycznych. Drugi i trzeci model to dwa „lokalne” modele północnej i południowej górnej części zbocza z wyszczególnionymi warstwami czwartorzędowymi. Takie podejście pozwala na określenie ciągłości warstw oraz wierne odwzorowanie morfologii terenu.

Parametry poszczególnych warstw geotechnicznych zostały przyjęte na pod-

stawie własnych badań laboratoryjnych oraz materiałów archiwalnych. Tabela 3 przedstawia parametry gruntu poszczególnych warstw modelu numerycznego.

W obrębie analizowanego modelu numerycznego zlokalizowano budynek mieszkalny, którego obciążenie (150 kPa) na grunt przyjęto szacunkowo. Pierwszy etap symulacji numerycznych polegał na stworzeniu „globalnego” modelu numerycznego, pozwalającego na określenie miejsca najbardziej zagrożo-

TABELA 3. Zestawienie zmiennych parametrów obliczeniowych gruntów dla poszczególnych warstw geotechnicznych

TABLE 3. Summary of calculation parameters for each geotechnical layers

Numer warstwy Layer number	Rodzaj gruntu Type of soil	Ciężar objętościowy Soil unit weight γ [$\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$]	Kąt tarcia wew. Friction angle φ' [$^{\circ}$]	Spójność Cohesion c' [kPa]	Moduł Younga Young's modulus E [MPa]	Współczynnik Poissona Poisson's ratio ν [-]
I	zwietrzelina niespoista non-cohesive weathered soil	20,3 ^{***}	28,1 ^{***}	–	32,5 [*]	0,45 [*]
II	zwietrzelina spoista plastyczna plastic cohesive weathered soil	19,2 ^{****}	25,5 ^{****}	12,0 ^{****}	32,5 [*]	0,35 [*]
III	zwietrzelina spoista twardoplastyczna slightly plastic cohesive weathered soil	20,8 ^{****}	25,6 ^{****}	12,0 ^{****}	35,0 ^{**}	0,3 ^{**}
IV	rumosz niespoisty non-cohesive rubble	20,7 ^{****}	29,2 ^{****}	–	70,0 ^{**}	0,2 ^{**}
V	rumosz spoisty cohesive rubble	21,7 ^{****}	21,3 ^{****}	17,0 ^{****}	60,0 ^{**}	0,3 ^{**}
VI	piaskowiec sandstone	24,5 ^{****}	15,0 ^{***}	30,0 ^{***}	100,0 ^{**}	0,25 ^{**}
VII	łupek shale	22,6 ^{****}	20,0 ^{***}	48,0 ^{***}	75,0 ^{**}	0,25 ^{**}

*Zimmermann i in., 1987; **Dłużniewski, 1997; ***Kadłubowski i in., 2015; **** badania własne.

*Zimmermann et al., 1987; **Dłużniewski, 1997; ***Kadłubowski et al., 2015; **** own research.

nego utratą stateczności oraz obliczenie „globalnego” wskaźnika stateczności. Drugim i trzecim etapem było przeprowadzenie symulacji dla dwóch numerycznych „lokalnych” modeli obejmujących tylko obszary zagrożone wyznaczone na podstawie modelu „globalnego”. Ze względu na mniejszy wymiar modele te pozwalały na lokalne uszczegółowienie budowy poprzez wyróżnienie większej liczby warstw geotechnicznych. Takie podejście pozwoliło na obliczenie lokalnych wskaźników stateczności, mówiących o lokalnych procesach osuwania się mas gruntu. Do przeprowadzenia obliczeń numerycznych wykorzystano program Z_SOIL v2016.

Wyniki

Badania geologiczno-inżynierskie

Wykształcenie litologiczne badanych gruntów jest bardzo zróżnicowane: od gruntów bardzo spoistych do mało spoistych z przewarstwieniami iłołupków. Skład granulometryczny podano w ta-

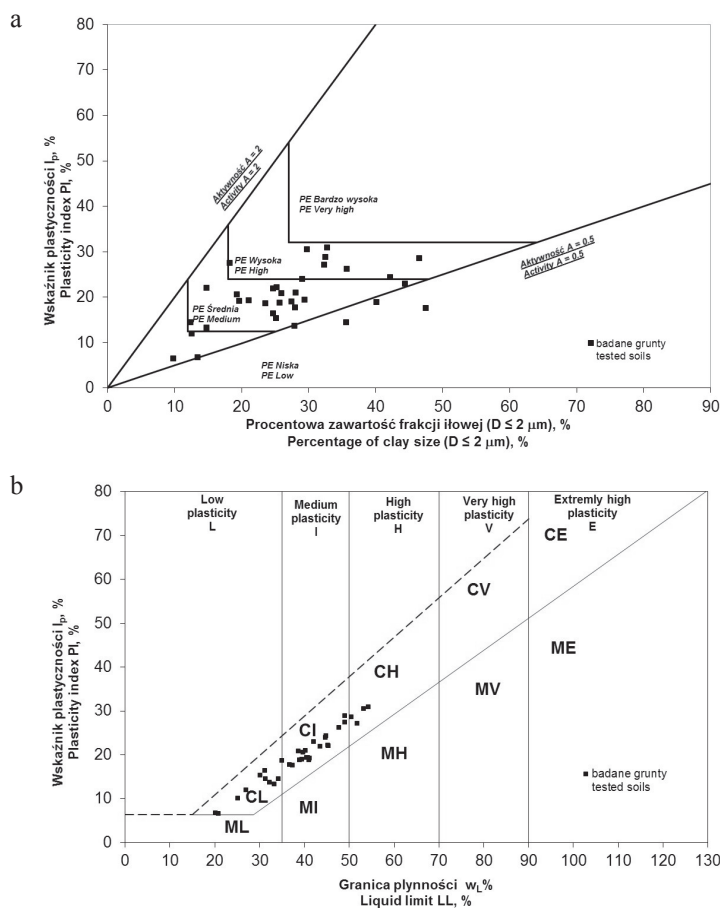
beli 4. Badania wykazały, że koluwalne grunty ilaste są w stanie od zwanego do plastycznego, mają zróżnicowaną wilgotność naturalną, maksymalnie sięgającą 34%. Największe wartości wilgotności naturalnej występują w próbkach gruntów pobranych z głębokości do 4 m p.p.t. Poniżej głębokości 16 m p.p.t wilgotność naturalna badanych gruntów nie przekracza 9%. Zauważalna jest tendencja, że wraz ze wzrostem głębokości maleją wartości stopnia plastyczności i wilgotności granicy płynności, co wskazuje na fakt, że w strefie przypowierzchniowej zachodzą procesy wietrzeniowe. Stan zagęszczenia reprezentowany przez naturalną gęstość objętościową waha się w granicach $1,90\text{--}2,45 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ i wynosi średnio $2,12 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$. Na podstawie nomogramu Casagrande’a według Head (1992) badane grunty można zaliczyć głównie do gruntów o plastyczności od małej i średniej (rys. 3a), a na podstawie nomogramu Van der Merwe’go do gruntów o potencjalnej ekspansywności od małej do dużej (rys. 3b). Uzyskane wyniki znajdują potwierdzenie

TABELA 4. Zmienność podstawowych fizycznych właściwości badanych gruntów
TABLE 4. The variability of the basic physical properties of tested soils

Uziarnienie Grain size distribution	\bar{x}	σ	min.	max.	ν
Fracja żwirowa f_z Gravel fraction Gr	7,7	11,7	0,0	45,9	1,52
Fracja piaskowa f_p Sand fraction Sa	32,0	17,4	0,8	74,9	0,54
Fracja pyłowa f_π Silt fraction Si	34,3	12,3	11,6	57	0,36
Fracja ilowa f_i Clay fraction Cl	26,0	10,5	8,0	47,5	0,40

\bar{x} – średnia arytmetyczna; σ – odchylenie standardowe; min., max. – minimalna i maksymalna wartość parametru; ν – współczynnik zmienności.

\bar{x} – arithmetical mean; σ – standard deviation; min., max. – minimum and maximum values; ν – coefficient of variation.



RYSUNEK 3. a – Nomogram plastyczności Casagrande’a według Head (1992); b – nomogram Van der Merwe’go z wynikami badań dla gruntów ilastych
 FIGURE 3. a – Casagrande plasticity chart by Head (1992); b – Van der Merwe chart with values for tested soils

w wynikach pęcznienia swobodnego według metody zaproponowanej przez H.J. Gibbsa i W.G. Holtza (Head, 1992). Większość badanych gruntów wykazuje małe wartości pęcznienia swobodnego, nieprzekraczające 100%. Jedyne dla jednej próbki spośród 20 badanych uzyskano pęcznienie wynoszące 200%, co może wskazywać na właściwości ekspansywne. Badania składu mineralnego wykazały, że dominującym minerałem ilastym w badanych gruntach jest illit, pobocznie

występuje beidellit, dodatkowo w prawie wszystkich próbkach występują węglany jako materiał cementujący oraz niewielkie domieszki substancji organicznej, związków żelaza, goethytu i syderytu. Podobne wyniki z oddalonej o około 20 km w kierunku północno-zachodnim Świnnej Poręby przedstawia Gaszyńska-Freiwald (2012) wskazując, że głównym minerałem budującym badane grunty jest mieszanopakietowy illit-smektyt.

Otrzymane wyniki badań właściwości fizycznych oraz składu mineralnego gruntu potwierdzają zróżnicowanie parametrów wytrzymałościowych, które zostały przedstawione w tabeli 3.

Badania geofizyczne

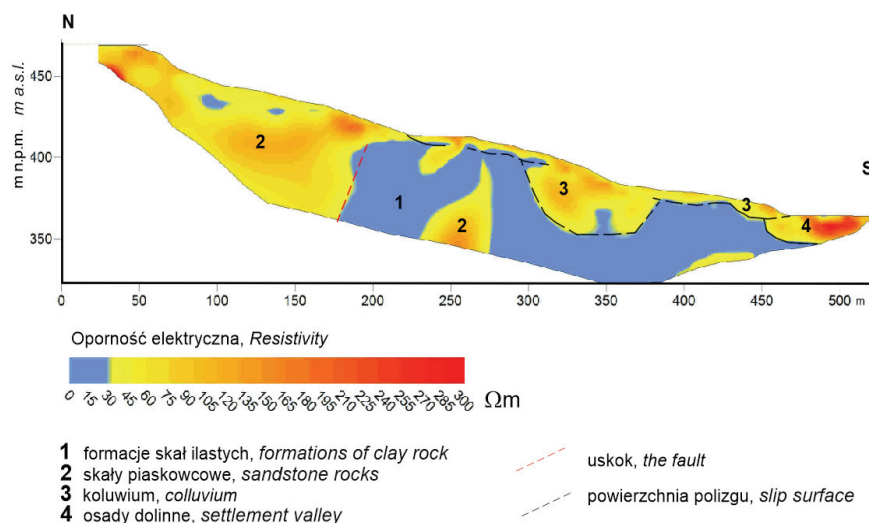
Analiza rezultatów badań metodą tomografii elektrooporowej. Przetworzenie uzyskanych pomiarów wykonano programem Res2DInv. Zastosowano kombinowaną metodę inwersji oporności. Wzdłuż analizowanego profilu pomiarowego wydzielono cztery warstwy geoelektryczne:

- warstwa 1 – o opornościach poniżej 30 Ωm , odpowiada formacjom skał ilastych,
- warstwa 2 – o opornościach powyżej kilkudziesięciu Ωm , odpowiada skałom piaskowcowym, które lokalnie mogą być przewarstwione skałami ilastymi,

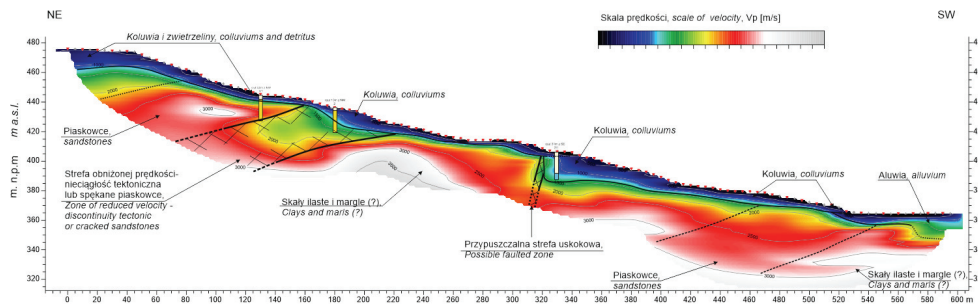
- warstwa 3 – o opornościach powyżej kilkudziesięciu Ωm , odpowiada koluwium i zwietrzelinie,
- warstwa 4 – o opornościach powyżej 100 Ωm , odpowiada niespoistym osadom dolinnym.

Charakter rozkładu oporności elektrycznej osadów pozwolił na wydzielenie zasięgu strefy poślizgu osuniętych skał (rys. 4). Strefa może sięgać do około 35 m p.p.t. (w przedziale 300–380 m profilu). Ponadto zobrazowany na przekroju elektrooporowym niemal pionowy kontakt między skałami o dużych i małych opornościach na 170 m profilu może wskazywać na występowanie w tym miejscu uskoku.

Analiza rezultatów badań sejsmicznych techniką tomografii refrakcyjnej. Analizę otrzymanych pomiarów sejsmicznych przeprowadzono w programie ReflexW. Na profilu wyróżniono dwie warstwy różniące się wartościami prędkości fali podłużnej (rys. 5):



RYSUNEK 4. Obraz oporności uzyskany w wyniku pomiarów ERT
 FIGURE 4. Resistivity image obtained in the ERT survey



RYСУNEK 5. Rezultat badań sejsmicznych techniką tomografii refrakcyjnej
 FIGURE 5. The results obtained in seismic refraction tomography survey

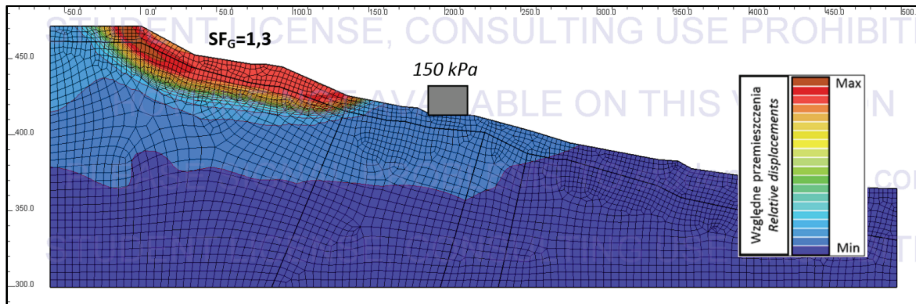
- warstwa 1 – charakteryzuje się wartościami prędkości fali podłużnej w zakresie od 200 do 1000 m·s⁻¹; jest to warstwa przypowierzchniowa o zmiennej miąższości, charakteryzuje się wartościami V_p w zakresie od 200 do 800–1000 m·s⁻¹, miąższość tej warstwy waha się znacznie od kilku metrów do około 30 m; warstwa ta odpowiada warstwie zwietrzelin, rumoszy i koluwiów;
- warstwa 2 – charakteryzuje się wartościami prędkości fali podłużnej przeważnie powyżej 2000 m·s⁻¹; jest to warstwa skał zalegających głębiej, pod warstwą 1; warstwa ta prawdopodobnie nie jest objęta ruchami masowymi; część ośrodka geologicznego zaliczona do tej warstwy charakteryzuje się wartościami prędkości fali podłużnej między 1500 a 2000 m·s⁻¹ (lokalnie 1000–1200 m·s⁻¹); obniżone prędkości wskazują na prawdopodobne spękanie ośrodka lub nieciągłości.

Otrzymany rozkład miąższości osadów przypowierzchniowych (koluwia i zwietrzelina) metodą sejsmiczną koresponduje z miąższościami osadów przypowierzchniowych o dużej oporności elektrycznej, wyinterpretowanymi metodą ERT.

Obliczenia numeryczne

Przeprowadzone obliczenia wskaźnika stateczności dla modelu numerycznego „globalnego” wskazują na małe prawdopodobieństwo powstania osuwiska obejmującego dużą część zbocza z powodu wskaźnika stateczności równego $SF_G = 1,33$, aczkolwiek należy zaznaczyć, że nie wykluczają takiej możliwości. Uruchomienie ruchów masowych o takim zasięgu mogłoby wystąpić na przykład na skutek długotrwałych ulewnych deszczy lub ruchów parasejsmicznych. Innym naturalnym czynnikiem mogącym wywołać destabilizację stanu równowagi jest ewentualna aktywność tektoniczna. Jednym z czynników antropogenicznych, egzogenicznych są obciążenia dynamiczne, które mogą spowodować lokalne uplastycznienia gruntu, co w konsekwencji może doprowadzić do uruchomienia osuwiska. Rysunek 6 przedstawia powierzchnie poślizgu mającego charakter osuwiska konsekwentno-zwietrzelinowego, które może być poprzedzone ruchami pełzaniowymi.

Wyniki symulacji numerycznych z uszczegółowionym modelem numerycznym, „lokalnym” 1, dostarczyły dodatkowych informacji o możliwych

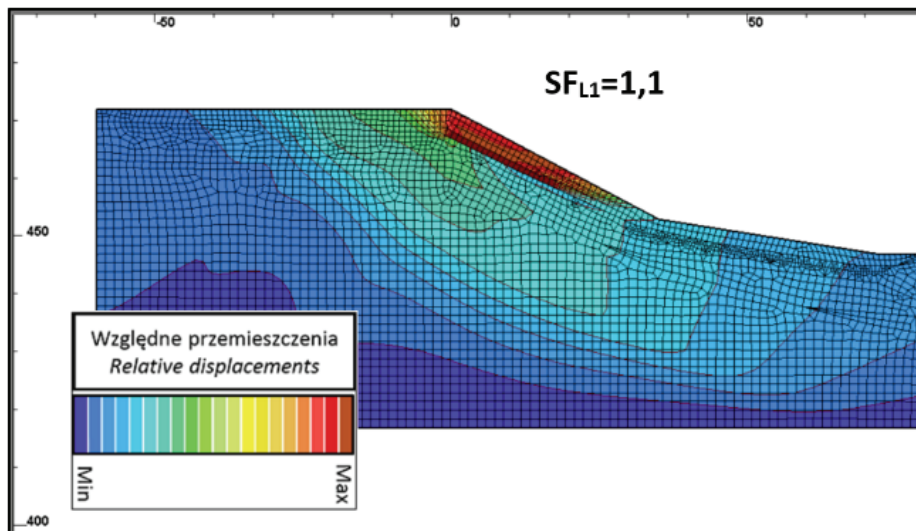


RYSUNEK 6. Względne przemieszczenia podczas aktywacji „globalnego” osuwiska konsekwentno-zwietrzelinowego
 FIGURE 6. The relative field of displacements during activation of “global” consistent-weathered soil landslide

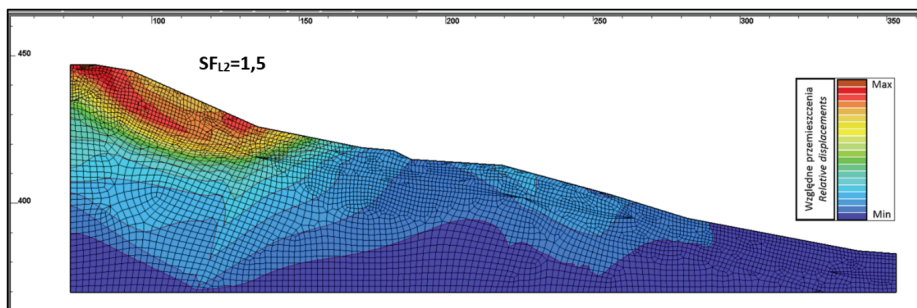
zsuwach zwietrzliny i koluwiów po skale macierzystej przy wskaźniku stateczności równym $SF_{L1} = 1,1$ (rys. 7). Należy podkreślić mały margines bezpieczeństwa wskaźnika stateczności (wartość $SF > 1$). Przedstawiana sytuacja wymaga działań zabezpieczających oraz monitoringu zmiany geodynamiki ob-

szaru znajdującego się powyżej obiektu budowlanego.

Drugi „lokalny” model wskazuje na korzystny stosunek sił utrzymujących zbocze w stanie równowagi do sił ścinających (rys. 8). „Lokalny” wskaźnik stateczności dla południowo-wschodniej części zbocza jest równy $SF_{L2} = 1,5$ i jest



RYSUNEK 7. Względne przemieszczenia „lokalnego” powierzchniowego ruchu masowego na granicy zwietrzelina – skała macierzysta w górnej części zbocza
 FIGURE 7. The relative field of displacements of “local” surface mass movements on the border weathered soil-bedrock in the upper part of the slope



RYSUNEK 8. Względne przemieszczenia podczas aktywacji „lokalnego” osuwiska konsekwentno-zwietrzelinowego w południowo-wschodniej części zbocza
 FIGURE 8. The relative field of displacements during the activation of “local” consistent-weathered soil landslide in the south-eastern part of the slope

większy niż w przypadku „globalnego” wskaźnika stateczności, co pozwala na uznanie tej części zbocza za stateczną. Niezależnie jednak od wyniku obliczeń należy tutaj również zwrócić uwagę na lokalizację obszaru osuwiska, które znajdują się poniżej obszaru predysponowanego do powstawania zsuwów. W przypadku aktywacji osuwiska w części górnej zbocza przemieszczone masy gruntu mogą doprowadzić do obciążenia górnej części modelu „lokalnego”² i zmiany obecnego stanu równowagi.

Podsumowanie

Przedstawione studium przypadku pokazuje przydatność prezentowanej wieloetapowej metodologii ewaluacji stateczności zbocza. Złożone zagadnienia badawcze takie jak geodynamika obszarów osuwiskowych wymagają kompleksowych badań. Wiarygodność uzyskanych wyników jest zależna od jakości wykonania poszczególnych badań. Dzięki wieloaspektowym metodom ba-

dawczym możliwe jest prognozowanie przyszłych zmian analizowanego obszaru. Opisany obszar charakteryzuje się budową podatną na spęływanie gruntu oraz osuwiska konsekwentno-zwietrzelinowe, co jest zdeterminowane kontaktem zwietrzelina i koluwia – skała macierzysta. Należy zaznaczyć, że w przypadku wystąpienia powierzchniowych ruchów masowych lub dodatkowych czynników destabilizacyjnych może również dojść do uruchomienia osuwiska o głęboko zakorzenionej powierzchni poślizgu o genezie tektonicznej. Wyniki obliczeń numerycznych wskazują na „globalny” wskaźnik stateczności powyżej krytycznego ($SF_G = 1,33$), którego mały margines bezpieczeństwa wymusza przeprowadzenie prac wzmocniających zbocze oraz ciągły monitoring zmiany geodynamiki cyklu procesów osuwiskowych w tym obszarze. W przeciwnym przypadku może dojść w konsekwencji tych zjawisk do aktywacji ruchów masowych obejmujących dużą część zbocza, co spowoduje realne zagrożenie życia i bezpieczeństwa ludzkiego.

Literatura

- Chowaniec, J. (red.), Skąpski, K. i Patorski, R. (1997). *Mapa hydrogeologiczna Polski w skali 1:50000, arkusz Sucha Beskidzka*. Warszawa: Państwowy Instytut Geologiczny.
- Chowaniec, J. i Wójcik, A. (red.), Mrozek, T., Rączkowski, W., Nescieruk, P., Perski, Z., Wojciechowska, T., Marciniak, P., Zimnal Z. i Granoszewski, W. (2012). *Osuwiska w województwie małopolskim. Atlas-Przewodnik*. Kraków: Departament Środowiska, Rolnictwa i Geodezji Urzędu Marszałkowskiego Województwa Małopolskiego.
- Dahlin, T. i Zhou, B. (2006). Multiple-gradient array measurements for multichannel 2D resistivity imaging. *Near Surface Geophysics*, 4(2), 112-123.
- Dłużniewski, J.M. (1997). *Hydro-Geo: Program elementów skończonych dla geotechniki, hydrotechniki i inżynierii środowiska*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza PW.
- Dziwiałowski, J. i Pilecki, Z. (2002). *Ocena warunków geologiczno-inżynierskich na terenie powierzchniowych ruchów masowych na przykładzie osuwiska w Zgłobicach. Studia, Rozprawy, Monografie 109*. Kraków: IGSMiE PAN.
- Gaszyńska-Freiwald, G. (2012). Wpływ tekstury iłolupków fliszu karpackiego na parametry deformacji. *Technika Poszukiwań Geologicznych Geotermia, Zrównoważony Rozwój*, 1, 61-72.
- Head, K.H. (1992). *Manual of Soil Laboratory Testing, Vol. 1: Soil classification and compaction tests*. London: Pentech Press.
- ISO/TS 17892-10:2004. *Geotechnical investigation and testing. Laboratory testing of soil. Part 10: Direct shear tests*.
- Kaczmarek, Ł. (2014). Geomorphological and geophysical analysis of the Warsaw slope stability conditions in the Ursynów district. *Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 65, 215-226.
- Kadłubowski, A., Mieszkowski, R., Fołtyn, P. i 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 Mariusz Małasiewicz.
- Kościówko, H. i Wyrwicki, R. (1996). *Metodyka badań kopalni ilastych*. Warszawa-Wrocław: Państwowy Instytut Geologiczny.
- Kowalczyk, S., Mieszkowski, R. i Pacanowski G. (2014). Ocena stateczności wybranych fragmentów skarpy warszawskiej w świetle badań geofizycznych metodą tomografii elektrooporowej (ERT). *Przegląd Geologiczny*, 62 (10/2), 634-640.
- Loke, M.H. (2013a). *Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys*. Gelugor: Geotomo Software.
- Loke, M.H. (2013b). *Optimisation of electrode arrays used in 2D resistivity imaging surveys*.
- Loke, M.H. i Barker, R.D. (1996). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131-152.
- Mościcki, W.J. i Antoniuk, J. (1998). *The method of electrical resistivity tomography. The examples of investigations for engineering-geology aims*. Paper presented at the V Scientifically-technical Conference: geophysics in geology, the mining and the protection of the environment. Kraków, Poland.
- Ostrowski, S., Rybak-Ostrowska, B. i Lasocki, M. (2013). Wykorzystanie przypowierzchniowych badań geofizycznych w rozpoznaniu budowy geologicznej na przykładzie stref osuwiskowych w Karpatach. *Przegląd Geologiczny*, 61(1), 67-73.
- Popielski, P., Kasprzak, A. i Smoliński, A. (2016). Ocena wpływu budowy geologicznej na wyniki numerycznego modelowania przemieszczeń ścian i dna wykopu w świetle danych pomiarowych ze stacji A14 I linii metra w Warszawie. *Przegląd Geologiczny*, 64(4), 230-237.
- Samouelian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A. i Richard, G. (2005). Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil & Tillage Research*, 83, 173-193.
- Wójcik, A. (2013). *Karta dokumentacyjna osuwiska nr 12-15-064 89 wraz z opinią*. Kraków: PIG-PIB – Oddział Karpacki.
- Zhdanov, M.S. i Keller, G.V. (1994). *The geoelectrical methods in geophysical exploration*. Amsterdam: Elsevier.
- Zienkiewicz, O. (1972). *Metoda elementów skończonych*. Warszawa: Arkady.
- Zimmermann Th., Rodriguez C. i Dendrou B. (1987). *Z_SOIL.PC: A program for solving soil*

mechanics problems on a personal computer using plasticity theory. Paper presented at Int. Conf. on Geomechanics, Innsbruck, Balkema.

Streszczenie

Stateczność zbocza i zagrożenie osuwiskowe w świetle kompleksowych badań geologicznych. W artykule przedstawiono studium przypadku oceny stateczności zbocza zlokalizowanego w południowej Polsce, w obszarze o skomplikowanej budowie geologicznej. Zaproponowano wieloetapową metodologię oceny stateczności zbocza. Zastosowane komplementarne techniki badawcze pozwoliły uzyskać dokładną i rzetelną ocenę stateczności analizowanego zbocza, a przedstawiona wieloetapowa procedura analizy uwarunkowań stateczności umożliwiła uwzględnienie różnych cech i mechanizmów destabilizujących stan równowagi, co pozwala na prognozowanie kierunków zagospodarowania przestrzennego.

Summary

Slope stability and failure hazards in the light of complex geological surveys. The multistage methodology of the slope

stability analysis, based on a case study, is presented in the paper. The study area is located in southern Poland, where geological conditions are complex. A numerous complementary research techniques that were applied provided reliable and exact assessment of equilibrium state of the slope. The results have shown that presented multistep procedure takes into account various destabilizing factors and therefore enables the prediction of the future spatial planning.

Authors' address:

Ireneusz Gawriuczenkow, Łukasz Kaczmarek,
Kamil Kielbasiński, Sebastian Kowalczyk,
Radosław Mieszkowski, Emilia Wójcik
Uniwersytet Warszawski
Wydział Geologii
Instytut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej
ul. Żwirki i Wigury 93, 02-763 Warszawa
Poland
e-mail: ireneusz.gawriuczenkow@uw.edu.pl