

## Badania właściwości geotechnicznych pokryw stokowych dolin potoków Jamne i Jaszczę w Gorcach

Tymoteusz Zydrón<sup>1\*</sup>, Gruchot Andrzej<sup>1</sup>, Piotr Demczuk<sup>2</sup>, Anna Bucala-Hrabia<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków

<sup>2</sup> Wydział Nauk o Ziemi i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie, Aleja Kraśnicka 2, 20-718 Lublin

<sup>3</sup> Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. S. Leszczyckiego PAN, ul. Św. Jana 22, 31-018 Kraków

\* Autor do korespondencji: [t.zydron@ur.krakow.pl](mailto:t.zydron@ur.krakow.pl)

### STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono wyniki badań parametrów geotechnicznych gruntów stanowiących pokrywy stokowe dwóch dolin potoków górskich w Gorcach w aspekcie oceny ich podatności osuwiskowej. Badania terenowe obejmowały określenie podstawowych właściwości fizycznych gruntów na kilku stanowiskach zlokalizowanych na zboczach obydwu dolin. Badania laboratoryjne obejmowały oznaczenie składu uziarnienia, granic konsystencji, współczynnika filtracji oraz wytrzymałości na ścinanie w aparacie bezpośredniego ścinania próbek zawodnionych oraz w aparacie trójosiowego ściskania metodą CIU. Wyniki badań wykazały, że badane grunty można określić jako utwory gruboziarniste z nieznaczną zawartością frakcji ilastej, charakteryzujące się niską plastycznością. Wartości kąta tarcia wewnętrznego większości badanych gruntów wahały się w zakresie od 28 do 38°, a spójności od 0 do 7 kPa. Większe wartości kąta tarcia wewnętrznego, a mniejsze spójności uzyskano z badań w aparacie trójosiowego ściskania. Współczynniki infiltracji z badań terenowych pozwalają scharakteryzować badane utwory jako średnio-przepuszczalne. Obliczenia stateczności wykonane z wykorzystaniem modelu SINMAP wykazały, że znaczna część analizowanego obszaru jest narażona na ruchy masowe, co daje bardziej konserwatywną oceną podatności osuwiskowej niż podają wyniki opracowane w programie SOPO. Prawdopodobieństwo utraty stateczności wzrasta na zboczach o nachyleniu przekraczającym 20°, a uzyskane wyniki obliczeń pozwalają uzyskać bardziej szczegółowy obraz podatności rozpatrywanego obszaru na ruchy masowe niż uzyskano stosując model SINMAP.

**Słowa kluczowe:** Gorce, wytrzymałość na ścinanie, stateczność zbczy, probabilistyczna ocena stateczności

## Research of geotechnical properties of slope covers from Jamne and Jaszczę stream valleys in Gorce Mts.

### ABSTRACT

Test results of geotechnical parameters of slope covers from valleys of two mountainous streams from Gorce Mts. are presented in the paper. The tests were carried out in the context of estimation of slope stability of analyzed watersheds. Field studies included determination of basic soil physical properties at several sites within studied area, laboratory tests involved determination of particle size distribution, consistency limits, permeability coefficients and shear strengths, which were carried out at direct shear box and CIU tests in triaxial apparatus. Test results revealed that tested slope covers can be described as coarse-grained soils with low content clay fraction, characterized by low plasticity. The values of the internal friction angle of the average bad land were high and ranged from 28 to 38 degrees, whereas cohesion varied from 0 to 7 kPa. Generally higher values of angle of internal friction and lower cohesion were obtained from triaxial tests. Values of permeability coefficients determined using infiltration method allow to characterize tested soils as a semi-permeable medium. Stability calculations using the SINMAP model have shown that a significant part of the analyzed area is prone to mass movements, giving a more conservative assessment of landslide vulnerability than results of the SOPO report. The likelihood of slope failure increases significantly on slopes of inclination exceeding 20 degrees, and the results of the calculations obtained the method provide a more detailed information of the mass movements susceptibility of the area than were obtained using the SINMAP model.

**Keywords:** Gorce Mts, shear strength, slope stability, probabilistic slope stability analysis

## WPROWADZENIE

Wśród istotnych czynników warunkujących stateczność zboczy jest można wymienić warunki litologiczne i strukturalne, które związane są z właściwościami geotechnicznymi i miąższością utworów zalegających na zboczach. Terenami szczególnie predysponowanymi na ruchy masowe są Karpaty Wewnętrzne, gdzie procesom osuwiskowym sprzyja rzeźba terenu (duże spadki) oraz skomplikowana budowa geologiczna (flisz). Jak wskazuje Margielewski [2008] zachodzące od XIX w. na terenie Karpat zmiany sposobu użytkowania terenu spowodowały zmiany sposobu krążenia wody w systemie stokowym z głębokiego na powierzchniowy i podpowierzchniowy. Stąd też przy obecnych warunkach klimatycznych na obszarze tym przeważają płytkie osuwiska obejmujące zasięgiem utwory pokrywowe lub skalno-zwietrzelinowe. Dla określenia podatności tych utworów na ruchy masowe niezbędna jest znajomość ich właściwości geotechnicznych m.in. parametrów charakteryzujących wytrzymałość na ścinanie, która ma bezpośredni wpływ na stateczność zboczy, oraz wodoprzepuszczalność, która wpływa na prędkość krążenia wody w systemie stokowym. Opisane parametry w dużym stopniu są związane z właściwościami fizycznymi gruntów, a głównie składem uziarnienia i porowatością.

Celem pracy było określenie właściwości geotechnicznych gruntów pokryw stokowych z terenu doliny potoków Jamne i Jaszce zlokalizowanych w Gorcach będących częścią polskich Karpat Zachodnich. Badania te przeprowadzone zostały w aspekcie oceny stateczności zboczy dolin obydwu potoków, a otrzymane wyniki badań właściwości geotechnicznych zastosowano do określenia warunkowań stateczności obszaru doliny.

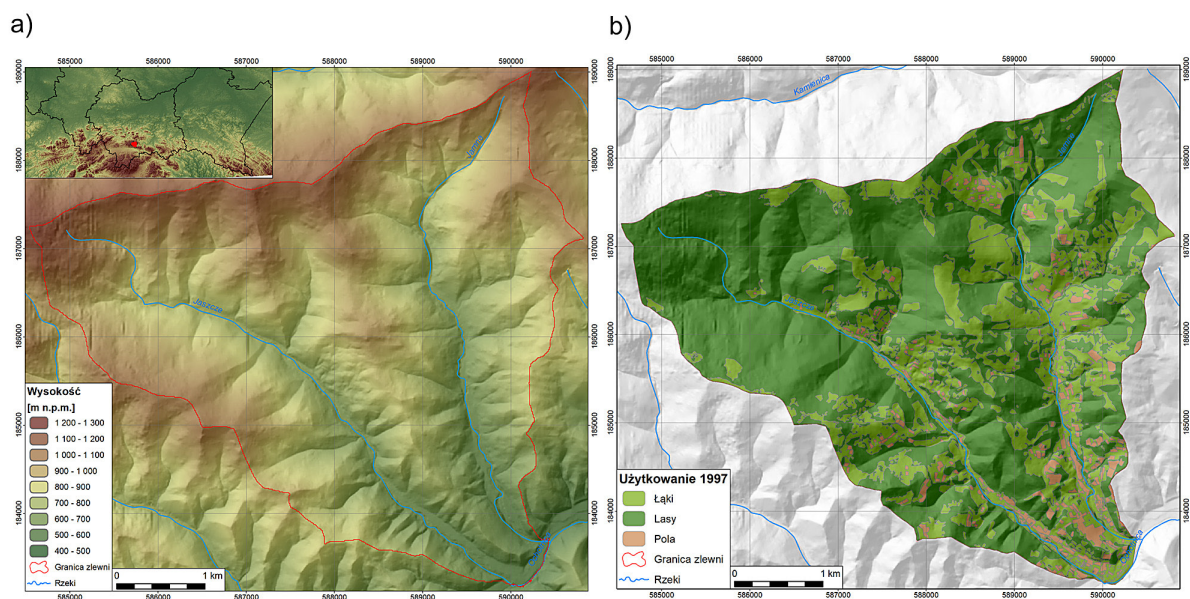
## CHARAKTERYSTYKA TERENU BADAŃ

Badania przeprowadzono w zlewniach potoków Jaszce i Jamne o powierzchniach odpowiednio 11,39 i 8,95 km<sup>2</sup> położonych u podnóża południowych stoków Górców. Góry te są częścią polskich Karpat Zachodnich o wysokości od 600 do 1300 m n.p.m. i rozciągają się na długości około 33 km z zachodu na wschód, w postaci szerokiego wału górskiego, o stromych stokach, głęboko rozciętych przez dopływy Raby i Dunajca (dorzecze górnej Wisły).

Zlewnie potoków Jaszce i Jamne znajdują się na w strefie zasięgu jednostki krynickiej płaszczowiny magurskiej [Sikora i Żytko 1968], w której największy udział mają gruboławicowe piaskowce i zlepieńce typu magurskiego, a mniejszy wkładki łupków i margli łąckich. Na obszarze tym najbardziej odpornymi na procesy denudacyjne kompleksami skalnymi są zlepieńce i gruboławicowe piaskowce, rozdzielone wkładkami warstw belowskich. Z kolei mało odporne na wietrzenie są warstwy inoceramowe, które warunkują rozwinięcie morfologicznych obniżzeń w strefie osi antykliny i w jej pobliżu (górnym odcinku doliny potoku Jaszce). Na wychodniach warstw inoceramowych zalegają najgrubsze pokrywy zwietrzelinowe, ze względu na mały udział odpornych na wietrzenie skał o spoiwie krzemionkowym. W pokrywach tych występuje również najmniejsza ilość cząstek szkieletowych w glebie. Stosunkowo gruba pokrywa zwietrzelinowa, niekiedy przekraczająca 1 m, występuje również na wkładkach warstw o przewodzie łupków (zarówno belowskich, jak i łąckich), przy czym wychodnie tych warstw są jednak stosunkowo wąskie. Cieńsza pokrywa zwietrzelinowa, z dużym udziałem szkieletu wytworzyła się na wychodniach odpornych na wietrzenie zlepieńców, gruboławicowych piaskowców oraz piaskowców z wkładkami warstw belowskich [Sikora i Żytko 1968].

W górnych partiach stoków występują przeważnie gleby płytkie i średnio głębokie, o miąższości od 20 do 50 cm [Adameczyk i Komornicki 1969]. Natomiast w dolnych partiach stoku miąższość pokrywy glebowej może przekraczać 1,5 m. Ponadto w profilach glebowych występują różnej wielkości frakcje szkieletowe. Głównie są to fragmenty piaskowców. Gleby głębsze i mniej kamieniste, często występujące na skałach serii marglisto-krzemianowej, są użytkowane rolniczo. Gleby płytsze i bardziej kamieniste, związane ze skałami serii kwarcowo-krzemianowej, są zwykle zalesione [Bucala i in. 2015].

Zlewnie potoków Jaszce i Jamne mają typowe dla Górców formy rzeźby - wysokie grzbiety i V-kształtne doliny, modelowane przez procesy denudacyjne [Niemirowski 1974]. Wypukło-wklęsłe stoki dolin o ekspozycji przeważnie wschodnio-południowej mają stoki o nachyleniu powyżej 15° (ponad 70% powierzchni zlewni) [Bucala i in. 2016]. Obydwie doliny położone są w obrębie dwóch pięter klimatycznych [Hess 1965] - umiarkowanie chłodnego o średniej temperaturze roku 4-6°C i chłodnego



Rys. 1. Mapy terenu badań: a) model wysokościowy, b) mapa pokrycia terenu  
 Fig. 1. Maps of study area: a) elevation model, b) land cover map

(2-4°C) powyżej 1100 m n.p.m. Średnia roczna suma opadów w latach 1972-2013 wyniosła 829,4 mm (dane IMGW).

## ZAKRES PRACY

Badania terenowe obejmowały określenie podstawowych właściwości fizycznych gruntów (gęstość objętościowa, wilgotność naturalna, współczynnik infiltracji) na kilku stanowiskach zlokalizowanych na zboczach obydwu dolin. Określenie gęstości objętościowej wykonano metodą żwirku kalibrowanego, a w przypadkach gruntów drobnoziarnistych metodą pierścienia tnącego. Współczynnik infiltracji określano metodą Kamińskiego [Dobrzański 1956] stosując cylinder o średnicy i wysokości po 25 cm. Pomiar wykonano w wykopach o głębokości od 0,3 do 0,5 m. W trakcie badania utrzymywano stały poziom wody w cylindrze o wysokości 10 cm, a pomiary wykonywano do czasu uzyskania stabilizacji wydatku infiltracji, który wynosił około 120 minut. Interpretując wyniki badań przyjęto, że wartość współczynnika infiltracji uzyskana w końcowej fazie pomiaru odpowiada wartości współczynnika filtracji. Wykonano 10 oznaczeń tego parametru dla różnych gruntów.

Badania laboratoryjne obejmowały oznaczenie składu uziarnienia, granic konsystencji, współczynnika filtracji oraz wytrzymałości na

ściananie. Skład uziarnienia oznaczono metodą łączonej analizy sitowej i areometrycznej [PKN-CEN ISO/TS 17892-4]. Granice konsystencji wykonano metodą Cassagrande'a dla frakcji drobnych [PKN-CEN ISO/TS 17892-12]. Współczynnik filtracji oznaczono w aparacie skonstruowanym w Laboratorium Geotechnicznym Katedry Inżynierii Wodnej i Geotechniki Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie. Aparat składał się z cylindra o średnicy i wysokości wynoszącej 19 cm, do którego podłączono przewody zasilające i ujmujące wodę. Aparat umożliwiał uzyskanie spadku hydraulicznego powyżej 6, co było poddyktowane niskimi wartościami współczynników infiltracji. Badania przeprowadzono przy przepływie wody dla dwóch kierunków, a więc od dołu do góry i od góry do dołu próbki. Łącznie wykonano badania dla 6 próbek.

Oznaczanie parametrów wytrzymałości na ściananie przeprowadzono na próbkach po odsianiu ziarn większych od 10 mm w aparacie bezpośredniego ścinania oraz trójosiowego ściskania. Badania w aparacie bezpośredniego ścinania wykonano na próbkach o wymiarach w przekroju poprzecznym 10×10 cm, a w przypadku jednej próbki gruntu w skrzynce 6×6 cm. Przed badaniem próbki o wilgotności naturalnej zagęszczano bezpośrednio w skrzynce aparatu do gęstości objętościowej określonej w terenie i zalewano wodą do wysokości strefy ścięcia. Konsolidację próbek przy obciążeniu 25, 50, 75 i 100 kPa wartości



przez 60 minut, a następnie ścinano z prędkością  $0,1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Łącznie przeprowadzono 10 serii ścięć obejmujących 39 próbek gruntu.

Badania w aparacie trójosiowym przeprowadzono na próbkach o średnicy 10 cm i wysokości 20 cm formowanych przy wilgotności naturalnej do gęstości objętościowej określonej z badań terenowych. Po umieszczeniu próbek w komorze ciśnieniowej próbki poddawano nasyceniu metodą ciśnienia wyrównawczego zgodnie z PKN-CEN ISO/TS 17892-9 zwiększając wartość ciśnienia w komorze co 50 kPa. Nasycenie próbek prowadzono do uzyskania wartości współczynnika Skemptona co najmniej  $B = 0,95$ , a czas ten wynosił co najmniej 3 doby. Następnie próbki poddano konsolidacji ciśnieniem efektywnym o wartości 50, 100 i 150 kPa, a po jej zakończeniu ścinano je w warunkach bez odpływu (CIU). Prędkość ścinania ustalono na podstawie przebiegu procesu konsolidacji. Łącznie ścinaniu poddano 25 próbek gruntu obejmujących 8 serii badań.

Otrzymane wyniki badań terenowych i laboratoryjnych opracowano pod względem statystycznym i wykorzystano do obliczeń stateczności obydwu zboczy. W analizie uwzględniono niezależne fragmenty doliny, gdzie w lipcu 1997 i 2008 roku powstałe liczne płytkie osuwiska wzbudzone ulewnymi opadami deszczu o wysokości odpowiednio 70 i 76,3 mm [Bucala 2009]. Dla sprawdzenia podatności zboczy na tej wysokości opady zastosowano model SINMAP [SINMAP User's manual], który pozwala określić ogólne prawdopodobieństwo wystąpienia płytkich ruchów masowych. W modelu tym obliczenia stateczności są zintegrowane z obliczeniami infiltracji wód opadowych. Zakłada się, że woda opadowa infiltruje pionowo do warstwy o małej przepuszczalności, co powoduje powstanie spływu śródglebowego oraz spływu wody w niższej położonej partii zboczy zgodnie ze spadkiem terenu. W efekcie tych obliczeń otrzymuje się informację o stopniu nasycenia powierzchniowych stref profilu gruntowego, tzw. indeks wilgotności, analizowanego terenu, który zależy od przewodności profilu gruntowego, powierzchni zlewni oraz intensywności opadu. Współczynnik bezpieczeństwa oblicza się z następującej zależności [Pack i in. 1999]:

$$FS = \frac{C + \cos \alpha \cdot \left[ 1 - \min \left( \frac{R \cdot a}{T \cdot \sin \alpha}; 1 \right) \cdot r \right] \cdot \tan \phi'}{\sin \alpha} \quad (1)$$

gdzie:  $R$  – dobowa wielkość opadu,

$T$  – przewodność profilu równoważna iloczynowi współczynnika filtracji gruntu i jego miąższości mierzonej w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni terenu,  
 $a$  – specyficzna powierzchnia zlewni wyrażona jako iloraz powierzchni zlewni z której woda dopływa do analizowanego przekroju i jego szerokości,  
 $r$  – iloraz gęstości wody i gęstości objętościowej gruntu,  
 $C$  – łączna spójność wynikająca z właściwości geotechnicznych gruntu oraz obecności korzeni roślinnych w profilu gruntowym.

Równanie powyższe stanowi zmodyfikowaną formę równania równowagi dla zbocza o ograniczonej długości. Szczegółowa metodyka wyrowadzenia tego wzoru opisana jest w pracy Packa i in. [1999]. Do obliczeń wykorzystuje się pełen zakres wartości właściwości geotechnicznych gruntów (współczynnik filtracji, kąt tarcia wewnętrznego i spójność) oraz nachylenia zbocza i miąższości pokryw stokowych. W efekcie obliczeń uzyskuje się dla analizowanego terenu szereg wartości współczynnika bezpieczeństwa, co pozwala wyznaczyć wskaźnik stabilności  $SI$ , który wyraża prawdopodobieństwo uzyskania granicznej wartości współczynnika bezpieczeństwa:

$$SI = \text{prob} (FS \geq 1,0) \quad (2)$$

Interpretacja wartości wskaźnika stabilności pozwala pod względem jakościowym ocenić podatność rozpatrywanego obszaru na utratę stateczności (tab. 1).

W przeprowadzonych obliczeniach nachylenie terenu przyjęto na podstawie danych uzyskanych z numerycznego modelu terenu o rozdzielczości 10 m pozyskanego z Centralnego Ośrodka Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej. Miąższość utworów przyjęto jako równą 1,0 m, co jest w dużej części zbieżne z uzyskanymi wynikami badań terenowych. Wysokość opadu przyjęto równą 76 mm, co odpowiadało opadowi z lipca 2008 r. W przypadku terenów zalesionych, na których nie prowadzono badań, przyjęto wartości współczynnika filtracji o rząd wielkości większe niż uzyskano z badań, natomiast nie rozpatrywano stateczności tego obszaru.

Ze względu na ograniczenia modelu SINMAP wynikające z jakościowego opisu prawdopodobieństwa wystąpienia ruchów masowych, wykonano również obliczenia stateczności z zastosowaniem modułu Slope/W programu GeoStudio

**Tabela 1.** Klasy wskaźnika stabilności SI (opracowano na podstawie [SINMAP...])**Table 1.** Stability class definition (own study according to [SINMAP...])

Przedział wartości SI	Charakterystyka obszaru	Uwagi
$SI > 1,5$	Obszar stabilny/stateczny	Pełen zakres wartości parametrów wytrzymałości na ścinanie pozwala uzyskać wartości $FS > 1,5$
$1,5 > SI > 1,25$	Strefa o względnej (umiarkowanej) stabilności	Najbardziej niekorzystne parametry wytrzymałości na ścinanie pozwalają uzyskać $FS$ z przedziału od 1,25 do 1,50
$1,25 > SI > 1,0$	Strefa prawie-stabilna	Najbardziej niekorzystne parametry wytrzymałości na ścinanie pozwalają uzyskać $FS$ z przedziału od 1,0 do 1,25
$1,0 > SI > 0,5$	Dolna strefa progowa niestabilności	Dla mniej niż połowy z zakresu parametrów wytrzymałości na ścinanie uzyskuje się $FS < 1,0$
$0,5 > SI > 0$	Górna strefa progowa niestabilności	Dla co najmniej połowy z zakresu parametrów wytrzymałości na ścinanie uzyskuje się $FS < 1,0$
$0,0 > SI$	Obszar niestabilny	Zbocze jest niestateczne niezależnie od wartości parametrów wytrzymałości na ścinanie ( $FS < 1,0$ )

[GEOSLOPE 2010], który umożliwia liczbową ocenę prawdopodobieństwa utraty stateczności zboczy. Dla potrzeb analizy opracowano obliczeniowy model zbocza o długości 10 m (analogicznie do rozdzielczości NMT) i miąższości pokryw stokowych 1,0 m. Jako poziom wody gruntowej wykorzystano dane wygenerowane w aplikacji SINMAP, natomiast wartości gęstości objętościowej i parametrów wytrzymałości na ścinanie odpowiadały pełnemu zakresowi uzyskanych wyników badań. Na podstawie obliczeń uzyskano rozkład wartości współczynnika bezpieczeństwa, a następnie wyliczono jego średnią i wskaźnik bezpieczeństwa:

$$\beta = \frac{\mu - 1,0}{\sigma} \quad (3)$$

oraz prawdopodobieństwo utraty stateczności skarpy:

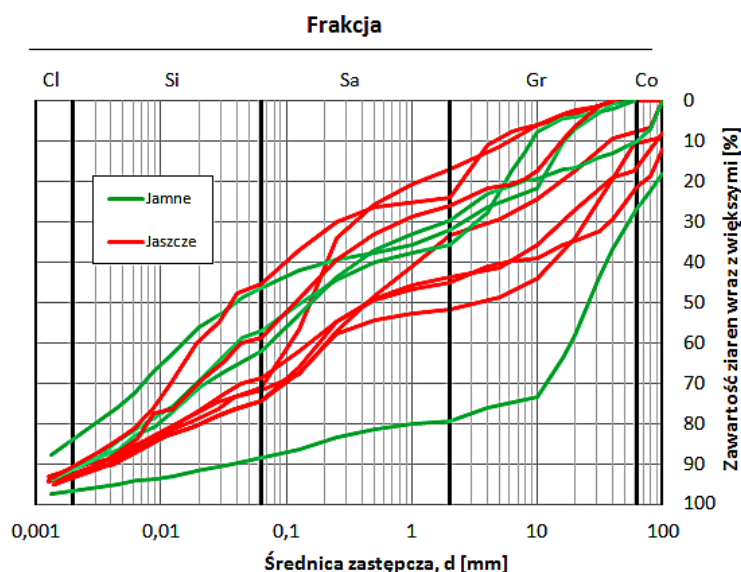
$$p_f = P[FS \leq 1,0] = \int_{-\infty}^1 f(FS) dFS \quad (4)$$

gdzie:  $\mu$  – średnia wartość współczynnika bezpieczeństwa,  
 $\sigma$  – odchylenie standardowe współczynnika bezpieczeństwa,  
 $FS$  – jak we wzorze (1).

Przy interpretacji wyników badań posłużono się wytycznymi Korpusu Inżynierów Armii Amerykańskiej [U.S. Army Corps of Engineers 1999].

## WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Na rysunku 2 przedstawiono krzywe uziarnienia badanych gruntów, które zgodnie z nomenklaturą geotechniczną [PN-EN ISO 14688-2:2006]



**Rys. 2.** Krzywe granulometryczne badanych gruntów  
**Fig. 2.** Grain-size distribution of tested soils

sklasyfikowano jako wielofrakcyjne grunty ilaste oraz piaski i żwiry (sagrCl, grsiCl, grsaCl, grsacIS, sagrcIS, sacGr, clSa oraz Gr). Zawartość frakcji ilastej w badanych gruntach nie przekraczała 10%, natomiast zawartość frakcji żwirowej kształtowała się zazwyczaj w zakresie od 17 do 51%. Z kolei wartości granic konsystencji (rys. 3) wskazują, że badane utwory charakteryzują się stosunkowo niską plastycznością, co oznacza, że są one wrażliwe na zmiany uwilgotnienia.

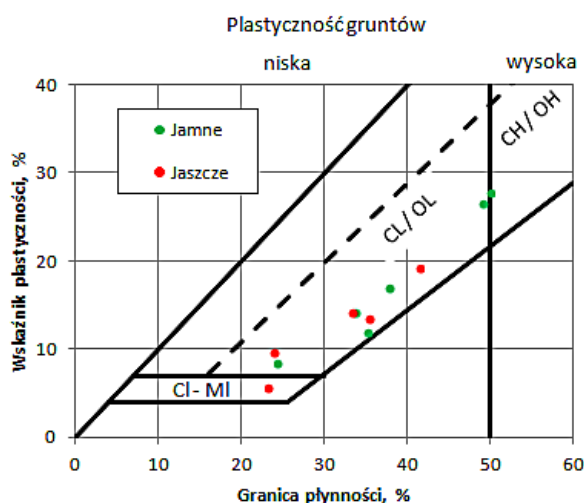
Wartości gęstości objętościowej badanych gruntów mieściły się w bardzo szerokim zakresie od 1,52 do 2,05 g cm<sup>-3</sup>, co wynikało ze zróżnicowanej ich wilgotności (12-27%). Natomiast wartości gęstości objętościowej szkieletu było nieco mniej zróżnicowane i mieściły się w zakresie od 1,35 do 1,73 g cm<sup>-3</sup> (średnio 1,42 g cm<sup>-3</sup> przy odchyleniu standardowym 0,08 g cm<sup>-3</sup>).

Badania współczynnika infiltracji wykazały, że badane grunty charakteryzowały się stosunkowo małym zróżnicowaniem wartości tego parametru (od 8,3·10<sup>-6</sup> do 4,7·10<sup>-5</sup> m s<sup>-1</sup>, średnio 2,6·10<sup>-5</sup> m s<sup>-1</sup>), co pozwala je zakwalifikować jako utwory średnio przepuszczalne, a w pojedynczych przypadkach jako słabo przepuszczalne [Pazdro i Kozerski 1990]. Z kolei wyniki badań laboratoryjnych współczynnika wodoprzepuszczalności były od 1 do 1,5-rzędu mniejsze niż uzyskano z pomiarów terenowych, co jest zbieżne zależnościami podawanymi w literaturze [Marciniak i in. 1999, Iwanek 2005, Rojna i Błaszczuk 2010].

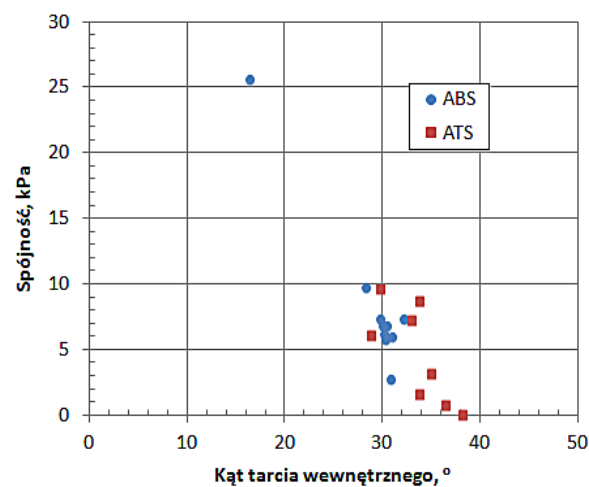
Z punktu widzenia oceny stateczności zboczy bardzo ważna jest znajomość parametrów charakteryzujących wytrzymałość na ścinanie gruntów. Uzyskane wyniki badań z aparatu bezpośrednie-

go ścinania i trójosiowego ściskania wykazały, że wartości kąta tarcia wewnętrznego badanych gruntów były z reguły wysokie i wahały się od 28 do 38°, a spójności nie przekraczały 10,0 kPa (rys. 4). Jedynie w przypadku gruntu pobranego z doliny Jamne uzyskano kąt tarcia wewnętrznego równy 16° i spójność równą 26 kPa. Można zauważyć, że wartości kąta tarcia wewnętrznego z badań w aparacie bezpośredniego ścinania były mniejsze niż otrzymano w aparacie trójosiowego ściskania, co jest zgodne z zależnościami otrzymanymi przez Atkinson'a i in. [1991]. Uzyskane wartości kąta tarcia wewnętrznego z badań trójosiowych były podobne do wyników podawanych przez Pisarczyka [2004] dla gruntów gruboziarnistych zastosowanych do budowy zapór ziemnych na terenie Karpat. Natomiast uzyskane wartości spójności były zdecydowanie mniejsze niż uzyskane przez Pisarczyka [2004] i wynika to z faktu, że cytowane badania wykonywane były na gruntach o wysokim zagęszczeniu.

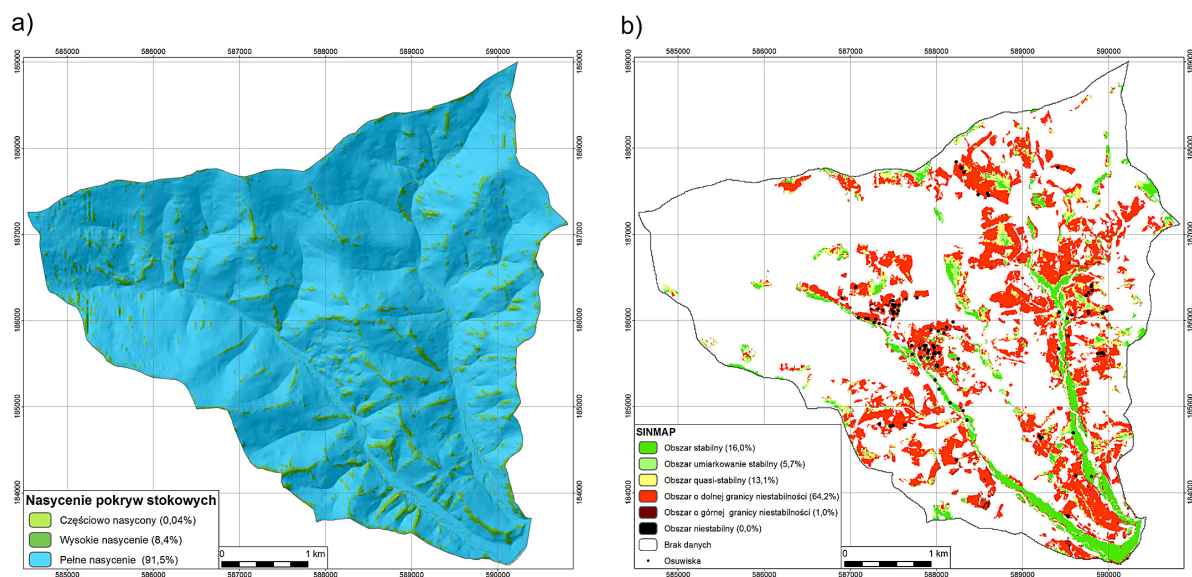
W oparciu o wyniki badań parametrów fizycznych i mechanicznych gruntów budujących pokrywy stokowe dolin obydwu potoków wykonano obliczenia stateczności. Wyniki obliczeń wskaźnika stabilności z modelu SINMAP wskazują (rys. 5a), że przy dobowym opadzie o wysokości 76 mm występuje praktycznie całkowite nasylenie powierzchniowej warstwy profilu gruntowego. Wydaje się to zgodne z wynikami obserwacji terenowych, które były wykonywane również w trakcie okresów występowania opadów. Wyniki obliczeń stateczności



Rys. 3. Wykres plastyczności badanych gruntów  
Fig. 3. Plasticity chart of tested soils



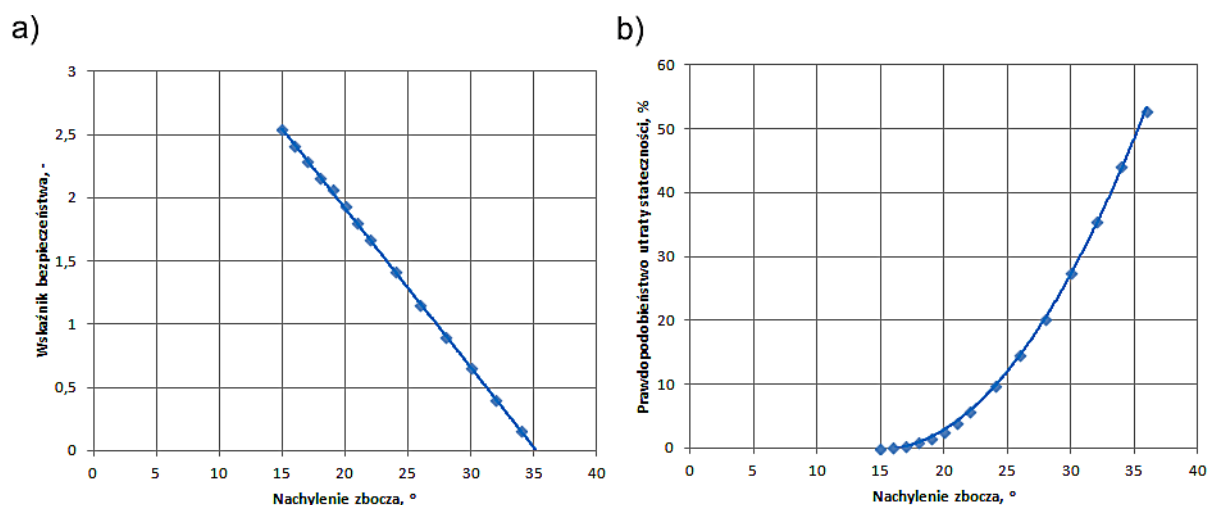
Rys. 4. Parametry wytrzymałości na ścinanie badanych gruntów: ABS – aparat bezpośredniego ścinania, ATS – aparat trójosiowego ściskania  
Fig. 4. Shear strength parameters of tested soils: ABS – direct shear apparatus, ATS – triaxial apparatus



Rys. 5. Wyniki obliczeń stopnia nasylenia pokryw stokowych (a) i wskaźnika stabilności (b) dla analizowanych dolin  
 Fig. 5. Calculations results of soil profile saturation (a) and stability index (b) obtained for analyzed valleys

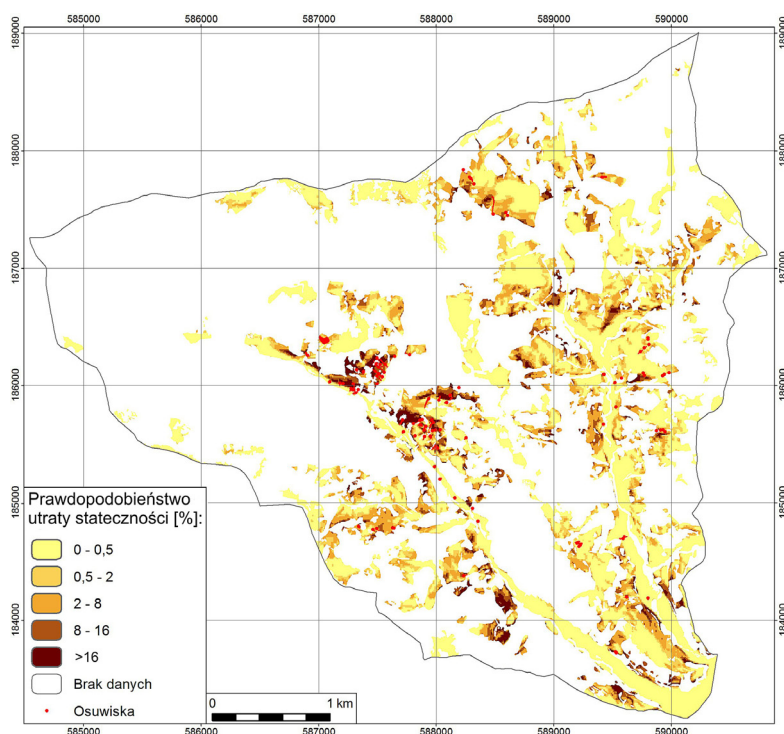
(rys. 5b) wskazują, że znaczna część obszaru obydwu dolin jest narażona na występowanie ruchów masowych ( $SI < 1,0$ ), co wydaje się zgodne z wynikami innych prac [Crosta i in. 2003, Zizioli 2013], które wskazują, że model ten daje przeszacowane wyniki obliczeń. Należy jednak zwrócić uwagę, że znaczna część osuwisk powstałych w latach 1997 i 2008 znajduje się na obszarze o niskim wskaźniku stabilności (dużej podatności na ruchy masowe). Można też stwierdzić, że obszar o niskich wartościach wskaźnika stabilności jest większy niż obszar osuwisk i terenów zagrożonych ruchami masowymi [Jurewicz i in. 2012], które opracowano w ramach projektu SOPO.

W celu uszczegółowienia zagrożenia osuwiskowego analizowanych dolin wykonane zostały obliczenia wartości wskaźnika bezpieczeństwa oraz prawdopodobieństwa utraty stateczności (rys. 6), które wykonano dla różnych nachyleń zbocza uwzględniając pełny zakres wartości uzyskanych parametrów geotechnicznych. Z przedstawionych danych wynika, że prawdopodobieństwo utraty stateczności wzrasta znacząco po przekroczeniu nachylenia zbocza powyżej  $20^\circ$ . Z kolei wartości wskaźnika bezpieczeństwa poniżej 2,5, które świadczą w budownictwie ziemnym o niskim stopniu wykonania budowli ziemnych [U.S. Army Corps of Engineers 1999], występują już, gdy nachylenie zbocza jest większe niż  $15^\circ$ .



Rys. 6. Wyniki obliczeń wskaźnika bezpieczeństwa (a) i prawdopodobieństwa utraty stateczności (b)  
 Fig. 6. Calculation results of reliability index (a) and probability of slope failure (b)





**Rys. 7.** Mapa rozkładu prawdopodobieństwa utraty stateczności na analizowanym terenie  
**Fig. 7.** Map of failure probability distribution within analyzed area

Otrzymane wyniki obliczeń zostały przeniesione na numeryczny model terenu (rys. 7), co umożliwiło zobrazowanie rozkładu wartości prawdopodobieństwa utraty stateczności stoków w obrębie analizowanych dolin.

Przedstawione dane dostarczają bardziej szczegółowej informacji o zagrożeniu ruchami masowymi w analizowanych zlewniach niż uzyskano z modelu SINMAP. Należy zwrócić uwagę, że w większości przypadków lokalizacja osuwisk zarejestrowanych na tym obszarze jest zbieżna z położeniem stref o wysokich wartościach prawdopodobieństwa utraty stateczności. Wyjątkiem są strefy brzegowe potoków, gdzie zostało zinwentaryzowanych kilka osuwisk. Rozbieżność wyników obliczeń i danych obserwowanych w tym przypadku wynika prawdopodobnie z dokładności modelu numerycznego terenu (wielkość piksela 10 m), który w pobliżu koryt rzecznych czy też obiektów liniowych może zaniżać rzeczywiste nachylenie terenu. Analizując te wyniki należy wziąć pod uwagę, że uzyskane wartości prawdopodobieństwa są ważne przy opadach dobowych o wysokości powyżej 70 mm i przy założeniu, że miąższość pokryw stokowych wynosi 1 m. W przypadku grubszej pokrywy stokowej prawdopodobieństwo utraty stateczności stoku będzie większe, a przy miąższości mniejszej od 1 m prawdopodobieństwo to będzie mniejsze.

## PODSUMOWANIE

Na podstawie otrzymanych wyników badań gruntów pokryw stokowych dolin potoków Jamne i Jaszcze można stwierdzić, że dominują grunty gruboziarniste z nieznaczną zawartością frakcji ilastej, charakteryzujące się niską plastycznością. Wartości kąta tarcia wewnętrznego większości badanych gruntów były wysokie, a spójności nieduże. Większe wartości kąta tarcia wewnętrznego, a mniejsze spójności uzyskano z badań trójosiowych. Współczynniki infiltracji określone na podstawie badań terenowych pozwalają scharakteryzować badane utwory jako średnio-przepuszczalne.

Uzyskane wyniki obliczeń stateczności z zastosowaniem modelu SINMAP wykazały, że znaczna część analizowanego obszaru jest narażona na powierzchniowe ruchy masowe, co jest bardziej konserwatywną oceną podatności osuwiskowej niż podano w opracowaniach z programu SOPO. Z kolei probabilistyczna ocena stateczności wskazuje, że prawdopodobieństwo utraty stateczności zboczy na tym terenie wzrasta znacząco na zboczach o nachyleniu przekraczającym 20°, a uzyskane tą metodą wyniki obliczeń pozwalają uzyskać bardziej szczegółowy obraz podatności rozpatrywanego obszaru na ruchy masowe niż uzyskano stosując model SINMAP.



Biorąc pod uwagę stosunkowo wysokie wartości współczynników filtracji, niskie wartości spójności, a także stosunkowo niewielką miąższość badanych pokryw stokowych można stwierdzić, że utwory te będą najbardziej podatne na spływy gruzowo-błotne wywołane intensywnymi opadami.

## LITERATURA

- Adamczyk B., Komornicki T., 1969. Charakterystyka gleboznawcza dolin potoków Jaszczce i Jamne. *Studia Naturae, Ser. A*, 3, 102-153.
- Atkinson J.H., Lau W.H.W., Powell J.J.M., 1991. Measurement of soil strength in simple shear tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 28, 255-262.
- Bucała A., 2009. Rola opadów nawaalnych w kształtowaniu stoków i koryt w Gorcach na przykładzie zlewni potoków Jaszczce i Jamne. *Przegląd Geograficzny*, 81, 3, 399-418.
- Bucała A., Budek A., Kozak M., 2015. The impact of land use and land cover changes on soil properties and plant communities in the Gorce Mountains (Western Polish Carpathians), during the past 50 years. *Zeitschrift für Geomorphologie* 59, 2, 41-74.
- Bucała A., Budek A., Kozak M., Starkel L., Wierjaczka Ł., 2016. Kierunki przemian środowiska przyrodniczego dolin gorczańskich. *Prace Geograficzne*, 252.
- Crosta G.B., Frattini P., 2003. Distributed modeling of shallow landslides triggered by intense rainfall. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, 81-93.
- Dobrzański Z., 1956. Połowe metody oznaczania współczynnika przepuszczalności skał wodonośnych i gruntów. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- GEO-SLOPE 2010. Stability modeling with SLOPE/W An Engineering Methodology (4th ed.). Alberta: GEO-SLOPE International Ltd (2007).
- Hess M. 1965. Piętra klimatyczne w polskich Karpatkach Zachodnich. *Zeszyty Naukowe UJ, Prace Geograficzne* 11, 1-258.
- Iwanek M., 2005. Badanie współczynnika filtracji gleb metodą polową i w laboratorium. *Acta Agrophysica*, 5(1), 39-47.
- Jurewicz E., Ozimkowski W., Rubinkiewicz J., Śmigiełski M., Tomaszczyk M., Cybulska D., Stachowska A., Stępczak P. 2012. Mapa osuwisk i terenów zagrożonych ruchami masowymi w skali 1:10000, gm. Ochotnica Dolna, pow. nowotarski, woj. małopolskie.
- Marciniak M., Przybyłek J., Herzig J., Szczepańska J., 1999. Badania współczynnika filtracji utworów półprzepuszczalnych w cylindrach. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 15, 3, 107-123.
- Margielewski W., 2008. Wpływ ruchów masowych na współczesną ewolucję rzeźby Karpat fliszowych. [W:] Starkel L., Kostrzewa A., Kotarba A., Krzemień K. (red). *Współczesne przemiany rzeźby Polski*, IGiGP UJ, Kraków.
- Niemirowski M., 1974. Dynamika współczesnych koryt potoków górskich (na przykładzie potoków Jaszczce i Jamne w Gorcach). *Zeszyty Naukowe UJ, Prace Geograficzne*, 34, Kraków.
- Pack R.T., Tarboton D.G., Goodwin C.N. 1999. GIS-based landslide susceptibility mapping with SINMAP. In: Bay JA (ed) *Proceedings of the 34th symposium on Engineering Geology and Geotechnical Engineering*, Logan, Utah, 1999.
- Pazdro Z., Kozerski B. 1980. *Hydrogeologia ogólna*. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa, ss. 624.
- Pisarczyk S. 2004. *Grunty nasypowe. Właściwości geotechniczne i metody badań*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, s. 238.
- PKN-CEN ISO/TS 17892-4:2004. *Badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 4: Oznaczanie składu granulometrycznego*. PKN, Warszawa.
- PKN-CEN ISO/TS 17892-9:2004. *Badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 9: Badanie gruntów w aparacie trójosiowego ściskania po nasyceniu wodą*. PKN, Warszawa.
- PKN-CEN ISO/TS 17892-12:2004. *Badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 12: Oznaczanie granic Atterberga*. PKN, Warszawa.
- PN-EN ISO 14688-2:2006. *Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania*. PKN, Warszawa.
- Rojna A., Błaszczak D., 2010. Badanie współczynnika filtracji gruntów. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Zielonogórskiego, Inżynieria Środowiska*, 138/18, 32-38.
- Sikora W., Żytko K., 1968. Warunki geologiczne dolin Jaszczce i Jamne. [w:] A., Medwecka-Kornaś (red.), *Doliny potoków Jaszczce i Jamne w Gorcach*, *Studia Naturae, ser. A*, 2, 23-38.
- SINMAP. User's manual. USGS.
- U.S. Army Corps of Engineers. 1999 Risk-based analysis in geotechnical engineering for support of planning studies, engineering and design, Rep. No. 20314-1000, Dep. of Army, Washington, D.C.
- Zizioli D., Meisina C., Valentino R., Montrasio L., 2013. Comparison between different approaches to modeling shallow landslide susceptibility: case history in Oltrepo Pavese, Northern Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13, 559-573.