

## WPŁYW WSKAŹNIKA POKRYCIA LIŚCIOWEGO (LAI) NA STATECZNOŚĆ ZBOCZY

Tymoteusz Zydrón<sup>1</sup>, Piotr Demczuk<sup>2</sup>, Andrzej Gruchot<sup>1</sup>, Marcin Siłuch<sup>2</sup>, Mariusz Klimek<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków, e-mail: t.zydron@ur.krakow.pl, rmgrucho@cyf-kr.edu.pl

<sup>2</sup> Zakład Geomorfologii, Wydział Nauk o Ziemi i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej, ul. Kraśnicka 2cd, 20-718 Lublin, e-mail: demczuk@poczta.umcs.lublin.pl, msiluch@poczta.umcs.lublin.pl

<sup>3</sup> Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Jagielloński, ul. Gronostajowa 7, 30-387 Kraków

### STRESZCZENIE

Celem pracy było określenie wpływu wartości wskaźnika pokrycia liściowego (LAI) na wyniki obliczeń stateczności stoku osuwiskowego położonego we wschodniej części Pogórza Wiśnickiego w miejscowości Gwoździec. Obliczenia zostały przeprowadzone w modułach VADOSE/W i SLOPE/W programu GeoStudio 2012 i polegały na integracji obliczeń infiltracji wody opadowej z obliczeniami stateczności. W efekcie obliczeń określono warunki opadowe (długość trwania i sumę opadu) powodujące naruszenie stateczności zbocza (tzw. opad progowy). Wyniki obliczeń wykazały, że wartości LAI z zakresu 1–3, odpowiadające roślinności trawiastej, sprzyjają w dłuższej perspektywie czasu gromadzeniu się wody gruncie, co ogranicza jego zdolność retencji w momencie wystąpienia intensywnych opadów. Z kolei pokrycie terenu, tożsame z wartością LAI=5 odpowiadającymi drzewom, powoduje zwiększenie zdolności retencyjnej gruntów, co wpływa na opóźnienie reakcji gruntu na opady (utrąę stateczności zboczy) w stosunku do terenu pokrytego roślinnością trawiastą. Stwierdzono również, że warunki wilgotnościowe panujące w zboczu przed rozpoczęciem intensywnych opadów mają znaczący wpływ na wielkość opadu progowego i w przypadku analizowanego zbocza wyniosły one od 90 mm dla okresu mokrego do ponad 700 mm dla okresu suchego.

**Słowa kluczowe:** stateczność zboczy, wskaźnik pokrycia liściowego LAI, opad progowy

### INFLUENCE OF LEAF AREA INDEX (LAI) ON SLOPE STABILITY

#### ABSTRACT

Determination of effect of the leaf area ratio on the results of slope stability calculation of one of the landslide prone slope located in the Pogórze Wiśnickie was presented in the paper. The calculations were carried out in modules Vadose/W and SLOPE/W of package GeoStudio 2012. The calculations involved the integration of rainfall infiltration process and slope stability calculations. As a result, the calculations allow to determinate precipitation conditions (time and accumulated precipitation height) causing slope failure (i.e. rainfall threshold). The calculation results showed significant impact of LAI on the results of modeling. It was revealed, that LAI values in range 1–3, corresponding to the grass vegetation, contribute in long-term to accumulation of precipitation within slope, which limits its retention ability when intense rainfalls occur. In turn, the leaf are index LAI = 5, corresponding to the coverage of trees, increase the retentive capacity of the soil, which resulting in delayed response of slope on rainfall with in comparison to an area covered with grass plants. It was also found significant impact of moisture content conditions on rainfall threshold. It was revealed that in case of analyzed slope threshold rainfall can be comprised from 90 mm to over 700 mm.

**Keywords:** slope stability, Leaf Area Index (LAI), threshold rainfall

## WPROWADZENIE

Ruchy masowe są procesami morfometrycznymi powszechnie występującymi na terenie polskich Karpat fliszowych powodując istotne przeobrażenia terenu. Na ruchy masowe w sposób bierny wpływają m.in. budowa geologiczna podłoża i utworów powierzchniowych oraz cechy morfologiczne terenu. Natomiast do czynników wpływających aktywnie na stateczność zboczy zalicza się między innymi roślinność, której oddziaływanie może mieć charakter mechaniczny lub hydrologiczny [Greenway 1987], a także opady atmosferyczne. Dlatego w literaturze dotyczącej ruchów masowych powszechnie stosowane jest pojęcie opadu progowego wyrażającego graniczną wartość opadu, który powoduje uruchomienie procesów osuwiskowych [Cornforth i in. 2005, Glade i in. 2005]. Badania prowadzone przez Gila [1997] nad mechanizmem inicjującym ruchy masowe wskazują, że istotne znacznie mają składniki bilansu wodnego tj. ewapotranspiracja, spływ powierzchniowy i odpływ podziemny, a także stopień nasycenia wodą profilu gruntowego. W przypadku roślinności, jej wpływ na obieg wody w przyrodzie jest opisywany przez wskaźnik pokrycia liściowego terenu (Leaf Area Index). Wskaźnik ten opisuje stosunek powierzchni liści rośliny do powierzchni gruntu pokrytej roślinnością [Herse 1981] i stanowi ważny element w obliczeniach parowania terenowego. Intensywność tego procesu wpływa na ilość wody zatrzymywanej w gruncie i oddawanej do atmosfery przez rośliny oraz grunt wpływając tym samym na obieg wody w gruncie, w tym również na stateczność zboczy.

Celem pracy było określenie wpływu stopnia pokrycia stoku osuwiskowego roślinnością na wartość opadu progowego i w konsekwencji na stateczność zbocza. Obliczenia przeprowadzono dla jednego ze zboczy osuwiskowych w miejscowości Gwoździec z obszaru Pogórza Wiśnickiego.

## ZAKRES I METODYKA PRACY

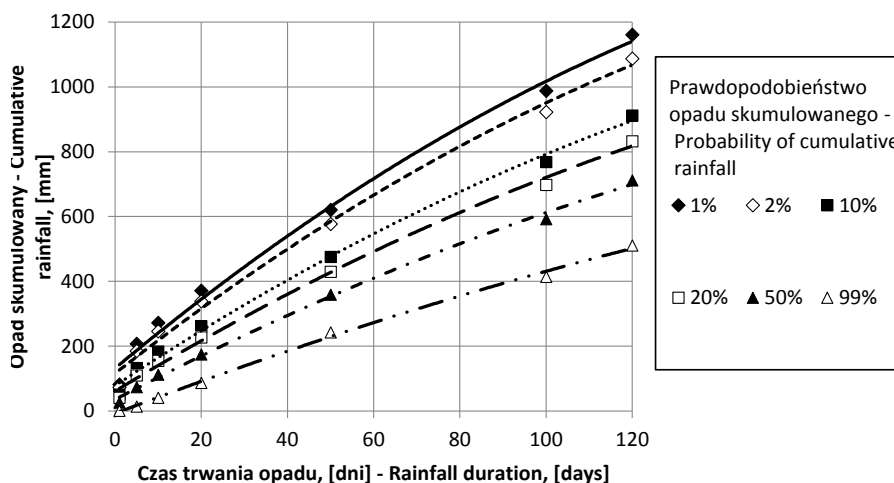
W pierwszej części pracy wykonano obliczenia zmian wartości ciśnienia porowego w gruncie w okresie 2004–2013, który charakteryzował się występowaniem bardzo wysokich (1229,1 mm), jak i niskich (521,6 mm) rocznych sum opadów. Do obliczeń wykorzystano dane meteorologiczne pochodzące ze Stacji Naukowej IGiGP UJ w Ła-

zach. W obliczeniach tych przyjęto pięć wartości wskaźnika liściowego LAI: 0, 1, 2, 3 i 5. Założono za Baldocchi [2012], że najmniejsza z wartości LAI=0 reprezentuje teren pozbawiony roślinności, wartości LAI z zakresu 1–3 odpowiadają roślinności trawiastej o zróżnicowanym stopniu rozwoju, natomiast LAI=5 odpowiada lasom mieszanym i liściastym klimatu umiarkowanego. W efekcie obliczeń otrzymano rozkład zmian ciśnienia porowego w analizowanym okresie czasu co umożliwiło tym samym ustalenie skrajnych wartości tego parametru w profilu gruntowym występujących w okresie wegetacji roślin. Przyjęto, że rozkład ciśnienia porowego jest tożsamy z wilgotnością gruntu, a uzyskane wartości ciśnienia porowego oraz parametrów geotechnicznych gruntów budujących stok umożliwiły określenie jego współczynnika bezpieczeństwa.

Kolejna część pracy polegała na określeniu wpływu opadów o prawdopodobieństwie wystąpienia 1, 2, 10, 20, 50 i 99% oraz czasie trwania od 1 do 120 dób (rys. 1) na stateczność zbocza w zależności od wartości współczynnika LAI oraz wyjściowej wilgotności gruntu. Wielkość opadu atmosferycznego opracowano na podstawie 30-letnich pomiarów (1984–2013) na stacji meteorologicznej w Łapanowie. Metodyka ich ustalenia została szczegółowo przedstawiona w pracy Demczuka i in. [2016]. W przeprowadzonych obliczeniach rozkład opadu w czasie został zróżnicowany i miał charakter:

- opadu o zmniejszającej się intensywności wraz z czasem jego trwania (rys. 1),
- opadu jednostajnego, o stałej intensywności i ilości odpowiadającej skumulowanej wartości o prawdopodobieństwie wystąpienia 1, 2, 10, 20, 50 i 99% oraz czasie trwania 120 dni,
- opadu o wzrastającej intensywności, gdzie zależność sumarycznej ilości opadu od jego czasu trwania była odwrotna niż przedstawiono na rysunku 1. W tym wariantcie w początkowym okresie analizy intensywność opadu jest niewielka, natomiast największą intensywność opad osiąga w końcowej fazie obliczeń.

W analizie przyjęto trzy wyjściowe rozkłady ciśnienia porowego (wilgotności) w gruncie zbocza. Dwa z nich odpowiadały początkowemu okresowi wegetacyjnemu (88 doba roku kalendarzowego) z okresu 2004–2013, przy czym jeden z nich uwzględniał maksymalne (okres mokry), a drugi minimalne (okres wilgotny) wartości ciśnienia porowego. Zastosowanie do obliczeń



Rys. 1. Zależność wartości skumulowanych opadu atmosferycznego na stacji meteorologicznej w Łapanowie od czasu jego trwania i prawdopodobieństwa wystąpienia

Fig. 1. Cumulative rainfall curves for different return period determined for meteorological station in Łapanów

120-dobowego ciągu opadowego umożliwiło określenie zmian warunków stateczności zbocza w okresie od końca marca do końca lipca, który w polskich Karpatach fliszowych pokrywa się znacząco z okresami nasilenia ruchów masowych [Gorczyca 2004]. Trzeci wariant obliczeń odpowiadał minimalnej wartości ciśnienia porowego gruntów zbocza występującej w środkowej części okresu wegetacyjnego (okres suchy).

Do obliczeń wykorzystano dwa moduły obliczeniowe pakietu GeoStudio 2012:

- Vadose/W [GEO-SLOPE 2010a] – do określenia wpływu warunków meteorologicznych (temperatury, wilgotności powietrza, opadu, prędkości wiatru, pokrycia liściowego LAI) na rozkład ciśnienia porowego w zboczu;
- Slope/W [GEO-SLOPE 2010b] – do obliczeń stateczności zbocza metodą Janbu, czego efektem było określenie współczynnika bezpieczeństwa zbocza.

W module Vadose/W do określenia intensywności ewaporacji stosuje się równanie Penman-Wilsona [Wilson 1990]:

$$AE = \frac{\Gamma \cdot Q + E_a \cdot v}{\Gamma + v \cdot A} \quad (1)$$

gdzie:

$$E_a = 0,35 \cdot (1 + 0,15 \cdot u_a) \cdot (B - A) \quad (2)$$

$u_a$  – prędkość wiatru,

$\Gamma$  – tangens kąta nachylenia krzywej ciśnienia pary wodnej,

$v$  – stała psychometryczna,

$Q$  – energia radialna netto dostępna przy powierzchni gruntu,

$A$  – odwrotność względnej wilgotności powietrza,

$B$  – odwrotność względnej przy powierzchni gruntu.

W przypadku występowania roślinności ewaporacja jest wyliczana z formuły:

$$AE^* = AE \cdot \left[ 1 - (-0,21 + 0,7 \cdot \sqrt{LAI}) \right] \quad (3)$$

gdzie:  $LAI$  – wskaźnik liściowy.

Z kolei potencjalna transpiracja obliczana jest ze wzoru:

$$PT = PE \cdot (-0,21 + 0,7 \cdot \sqrt{LAI}) \quad (4)$$

Formuła ta wyraża ilość wody dostępnej dla roślin, gdy grunt jest w pełni nasycony. W przypadku, gdy grunt jest nienasycony wielkość transpiracji jest wyliczana z zależności:

$$AT = \frac{2 \cdot PT}{R_r} \cdot \left( 1 - \frac{R_n}{R_r} \right) \cdot PML \quad (5)$$

gdzie:  $R_r$  – głębokość strefy korzeniowej roślin; dla  $LAI=1-3$  przyjęto 0,1-0,2 m, a dla  $LAI=5$  przyjęto 0,9 m,

$R_n$  – odległość korzeni od węzła obliczeniowego,

$An$  – pole powierzchni obliczeniowej dla pojedynczego węzła,

$PML$  – funkcja uwzględniająca różny stopień dostępności wody w gruncie dla roślin w zależności od ciśnienia ssania.

W każdym z wariantów obliczeniowych reprezentatywne wartości poszczególnych czynników meteorologicznych (maksymalna i minimalna temperatura powietrza, wilgotność powietrza, prędkość wiatru) przyjęte zostały jako średnie wartości z wielolecia 2004–2013. W obliczeniach przyjęto, że wartości LAI są zmiennymi zależnymi od fazy wegetacji, gdzie docelowe (maksymalne) ich wartości uzyskiwane są w środku okresu wegetacyjnego, w okresie kwitnienia roślin. Charakterystykę tego parametru przyjęto zgodnie z propozycją podaną w oprogramowaniu GeoStudio (rys. 2).

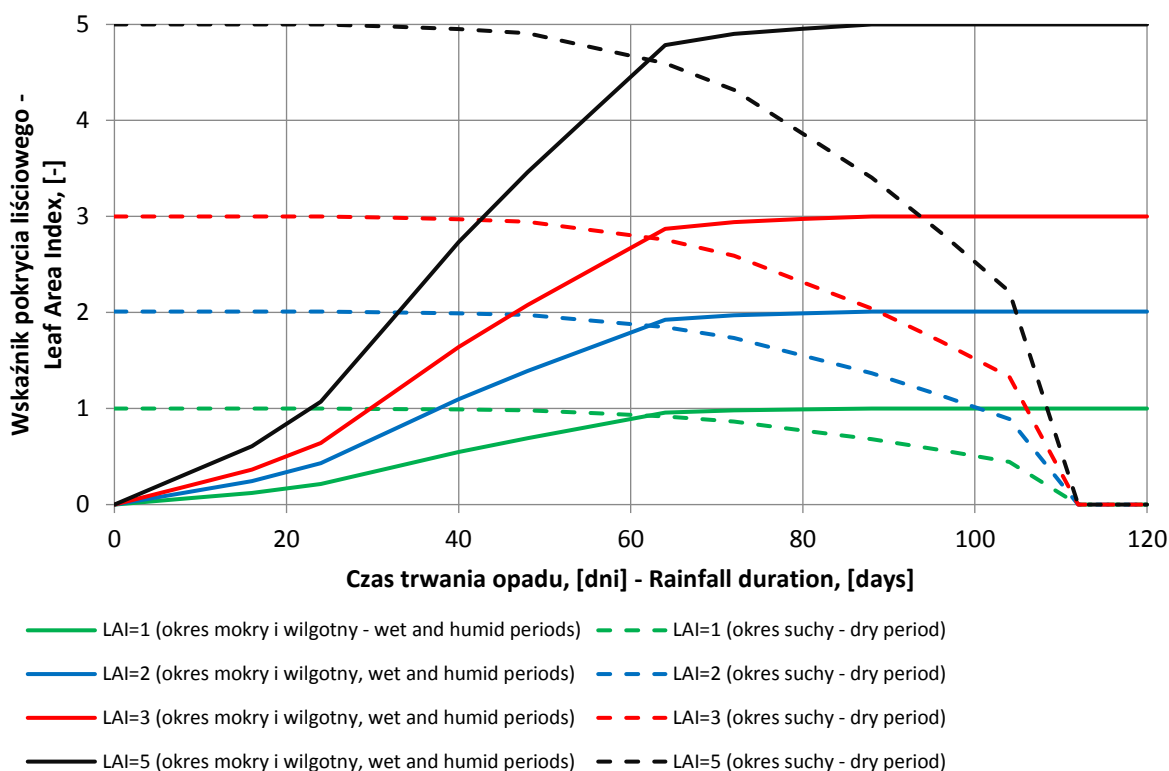
Na podstawie otrzymanych wyników z 270 symulacji opadów o różnej intensywności i czasie trwania przy założonym LAI uzyskano w module Vadose/W rozkład ciśnień porowych w zboczu oraz wartości składników bilansu wodnego (spływ powierzchniowy, odpływ, ewapotranspiracja oraz retencja). Dla każdej symulacji wykonano także obliczenia współczynników bezpieczeństwa zbocza (moduł Slope/W), co pozwoliło ustalić czas trwania i wartości opadu progowego, którego przekroczenie będzie powodować utratę stateczności zbocza.

## CHARAKTERYSTYKA GEOTECHNICZNA ANALIZOWANEGO ZBOCZA

Analizowane zbocze znajduje się we wschodniej części Pogórza Wiśnickiego w miejscowości Gwoździec (rys. 3). Długość zbocza na odcinku od wododziału do dna doliny wynosi około 350 m, a jego wysokość 70 m. Grubość pokrywy stokowej wahała się od 1,2 do 1,5 m w górnej części stoku oraz do 2,5 m w części dolnej. Wyniki badań terenowych wykazały, że w górnej części profilu gruntowego występują pyły i pyły ilaste, a nad piaskowcami i łupkami warstw istebniańskich wyróżniono ponadto warstwę drobnoziarnistych piasków pylastych. W tabeli 1 zestawiono podstawowe parametry geotechniczne warstw gruntów przedmiotowego stoku.

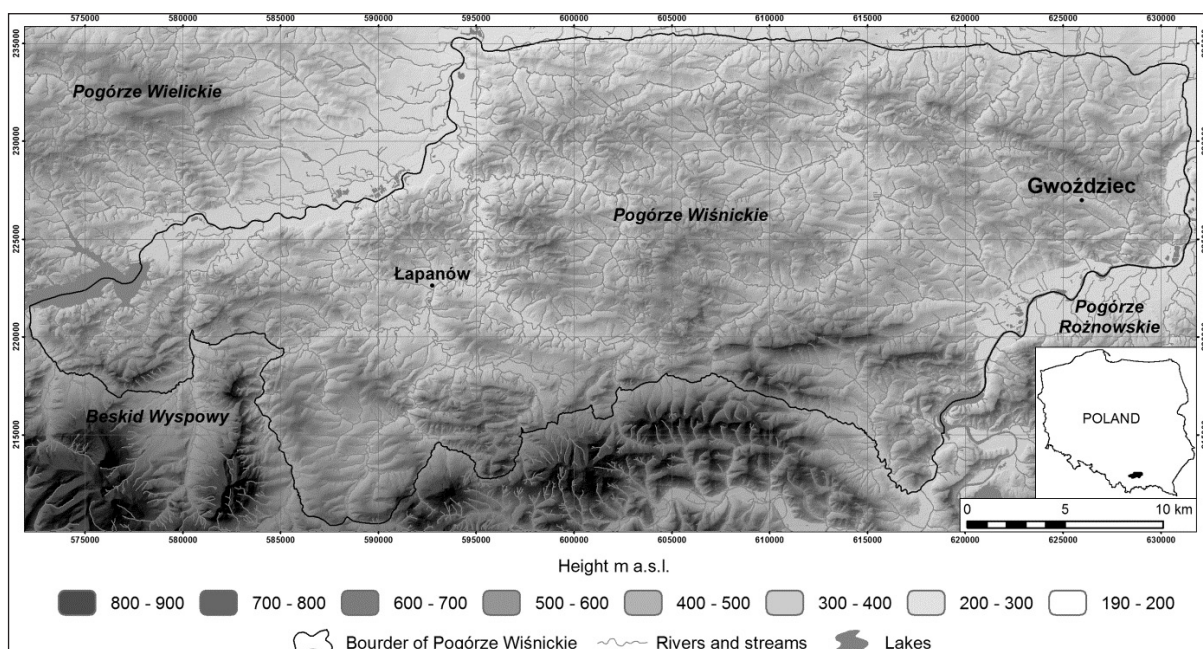
## WYNIKI OBLICZEŃ I ICH ANALIZA

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń otrzymano zależności zmian współczynnika bezpieczeństwa (FS) od prawdopodobieństwa wystąpienia opadu, wartości wskaźnika pokrycia liściowego LAI oraz warunków wilgotności-



Rys. 2. Rozkład wartości LAI wykorzystany w symulacjach numerycznych [GEO-SLOPE 2010a]

Fig. 2. Distribution of LAI used in numerical modeling



Rys. 3. Lokalizacja analizowanego stoku.

Fig. 3. Location of study area

Tabela 1. Parametry geotechniczne gruntów pokryw stokowych

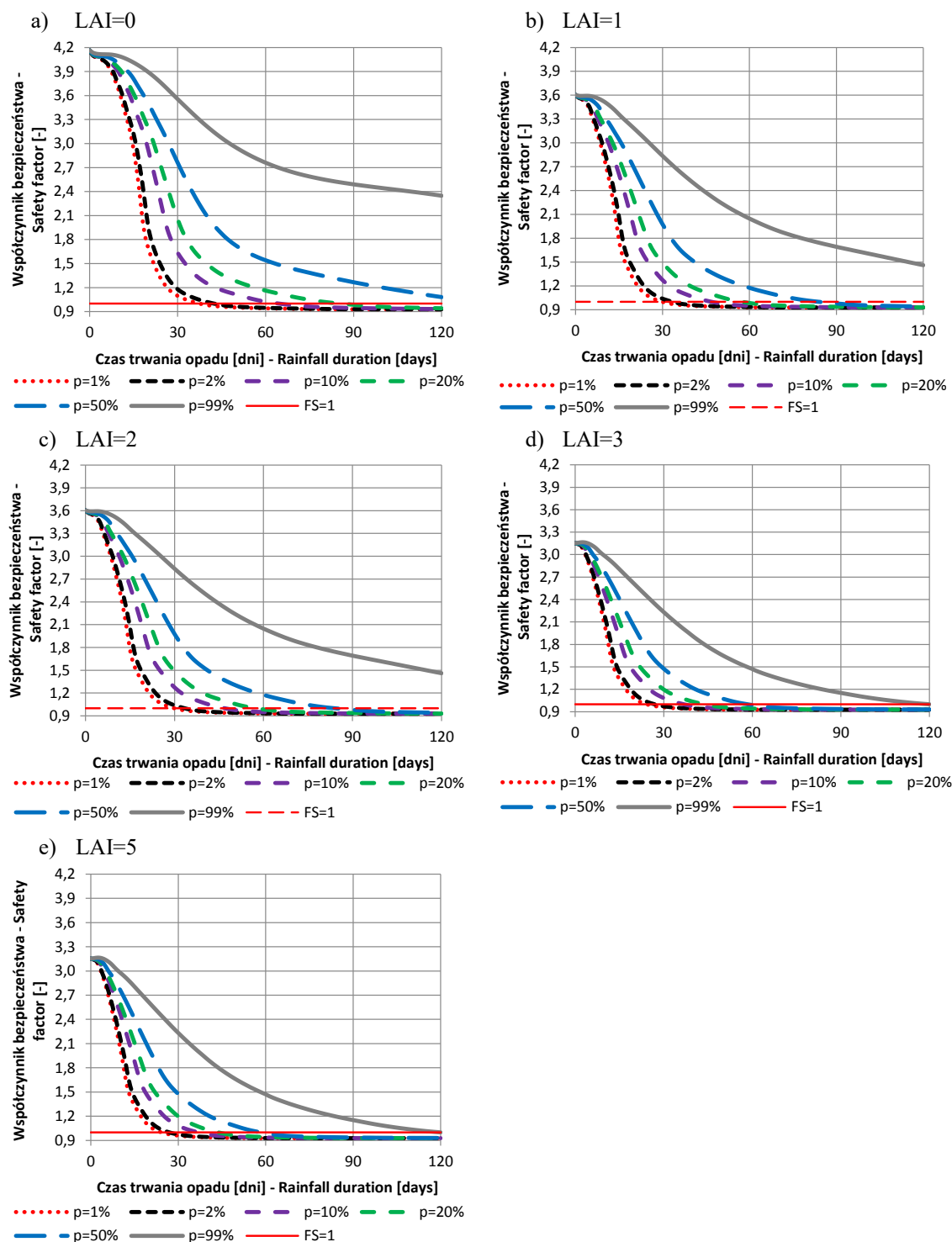
Table 1. Geotechnical parameters of slope covers' soils

Lp.	Zawartość frakcji [%]:			Nazwa gruntu wg EN ISO -14688:2006	Gęstość objętościowa g×cm <sup>-3</sup>	Wilgotność naturalna %	Granica plastyczności %	Granica płynności %	Współczynnik filtracji ms <sup>-1</sup>	Kąt tarcia wewnętrznego °	Spójność kPa
	Sa	Si	Cl								
1	15,5	77,0	7,5	Si (pył)	1,58	25,1	19,6	26,8	5,3·10 <sup>-7</sup>	34,4	0
2	12,7	77,0	10,3	clSi (pył ilasty)	1,77	19,1	19,6	31,9	8,6·10 <sup>-7</sup>	16,6	0,5
3	25,8	65,3	8,9	clSi (pył ilasty)	1,80	17,9	22,8	42,7	6,9·10 <sup>-7</sup>	18,6	1,0
4	72,5	23,1	4,4	siSa (piasek pylasty)	1,82	19,0	15,7	20,6	1·10 <sup>-5</sup>	29,5	0
5	Podłoże skalne – piaskowce										

wych panujących na początku okresu obliczeń (okresy mokry, wilgotny i suchy). Na rysunku 4 przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń stateczności zbocza. Wskazują one, że czas reakcji stoku na zadaną w obliczeniach wielkość opadu i charakter zmian współczynnika bezpieczeństwa był zależny od prawdopodobieństwa wystąpienia opadu oraz wartości wskaźnika LAI. Opady o dużej intensywności powodowały szybsze zmiany współczynnika bezpieczeństwa, które w większości przypadków prowadziły do zmniejszenia jego wartości poniżej krytycznej ( $FS \leq 1,0$ ). Analizując wpływ wskaźnika pokrycia liściowego LAI na zmiany wartości współczynnika bezpieczeństwa stwierdzono, że najszybciej utrata stateczności występowała na stoku, którego wskaźnik wy-

nosił  $LAI=3$ , a najwolniej przy  $LAI=0$ . Wpływ wskaźnik LAI na czas utraty stateczności wynikał częściowo także z początkowych wartości współczynnika bezpieczeństwa, które przyjęto jako charakterystyczne z 10-letniego okresu obliczeniowego i dla okresu wilgotnego mieściły się w zakresie od 3,1 do 4,2 (rys. 4). Wartości te uwzględniały długoterminowy wpływ pokrycia terenu roślinnością na wilgotność gruntu oraz stateczność zbocza. W tym przypadku najmniejszą wartością współczynnika bezpieczeństwa charakteryzowało się zbocze, którego wskaźnik pokrycia liściowego wynosił  $LAI=3$ , a największym zbocze przy wskaźniku  $LAI=0$ .

Z geomorfologicznego punktu widzenia istotny jest czas od rozpoczęcia opadu do uzyskania

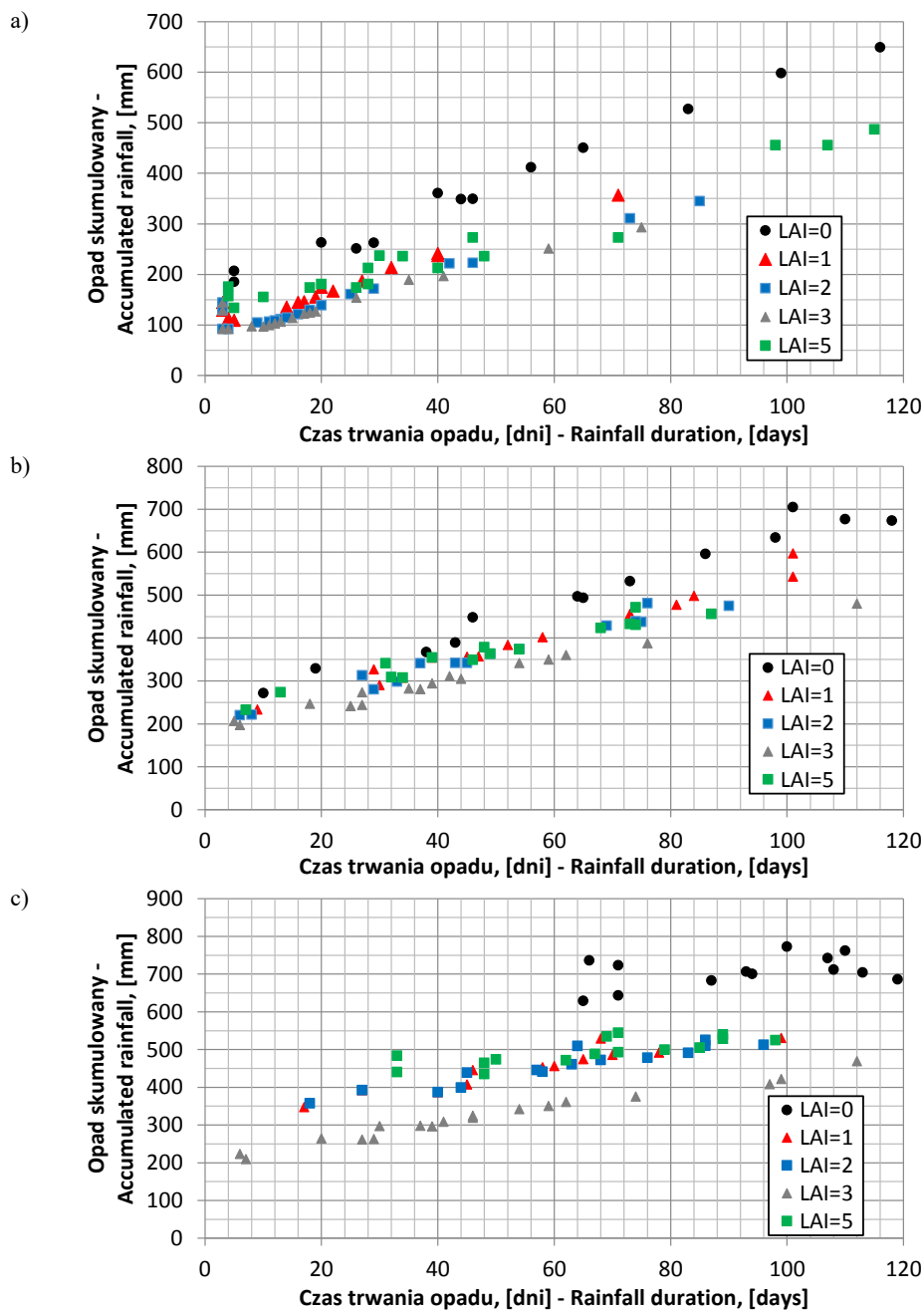


Rys. 4. Zależność stateczności zbocza od prawdopodobieństwa wystąpienia opadu o jednostajnym natężeniu przy założonych wartościach wskaźnika LAI dla okresu wilgotnego (przykłady)

Fig. 4. Dependency of slope stability results of probability on rainfall of uniform intensity obtained for various values of LAI for wet period (exemplary results)

wartości współczynnika bezpieczeństwa  $FS=1,0$ . Dlatego określono czas i wielkość opadu, które prowadzą do utraty stateczności (rys. 5). Na podstawie obliczeń stwierdzono, że początkowa wilgotność gruntów stoku wpływa na wartość opadu

progowego i czasu jego wystąpienia. Przykładowo dla okresu mokrego (rys. 5a) najmniejsza wartość opadu progowego wynosiła około 90 mm, dla okresu wilgotnego (rys. 5b) około 190 mm. W okresie suchym minimalny opad progowy



**Rys. 5.** Wpływ wskaźnika pokrycia liściowego LAI na czas trwania i wielkość skumulowanego opadu progowego dla okresu mokrego (a), wilgotnego (b) i suchego (c)

**Fig. 5.** Influence of Leaf Area Index on duration and cumulative value of threshold rainfalls for: wet (a), humid (b) and dry (c) periods

wynosił już ponad 200 mm. Z kolei maksymalne wartości opadu progowego wynosiły 650 mm dla okresu mokrego, 705 mm dla okresu wilgotnego oraz 762 mm dla okresu suchego. Otrzymane dane potwierdzają zatem, że wielkość opadu prowadzącego do utraty stateczności zbocza nie zależała wyłącznie od wielkości opadu, ale również od jego rozkładu w czasie oraz warunków gruntowych. Uzyskane z obliczeń minimalna wartość

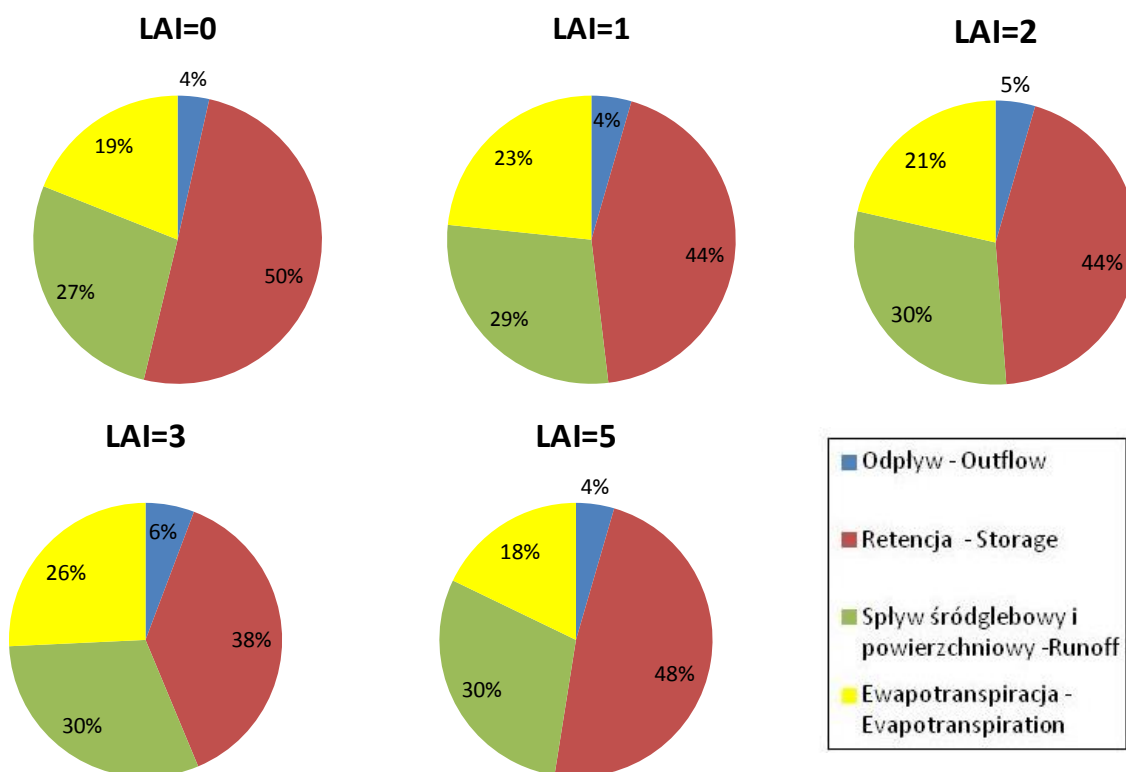
opadu progowego dla okresu mokrego były nieco mniejsze niż podają Gil i Długosz [2006] dla osuwisk zwietrzelinowych w Polsce, ale mieściła się w zakresie opadów progowych opisanych w pracy Górczycy [2004].

Zauważalne było również, że otrzymane wartości opadu progowego były w znaczącym stopniu związane z wskaźnikiem LAI. Niezależnie od wyjściowej wilgotności gruntów stoku najmniej-

sze wartości opadu progowego uzyskano dla stoku, którego wskaźnik pokrycia liściowego wynosił LAI=3, a największe dla LAI=0. Najmniejsza wartość opadu progowego dla okresu mokrego przy LAI=0 wynosiła 185 mm (rys. 5a), 92 mm przy LAI=3 oraz 134 mm przy LAI=5. W skrajnych przypadkach czas trwania ciągłego opadu wywołującego utratę stateczności stoku wyniósł 3 doby. Otrzymane wyniki obliczeń wskazują, że najbardziej korzystne warunki stateczności występują na stoku bez roślinności, co stoi w sprzeczności z wynikami badań Simon'a i Collison'a [2002]. Niewątpliwie brak roślinności stanowi zagrożenie wystąpienia procesów spływu powierzchniowego i spłukiwania, co później może prowadzić do powstawania osuwisk. Wyniki pomiarów tensjometrycznych [Ng i in. 2013a, 2013b, Ishaka i in. 2013] wskazują, że pokrycie roślinne, a zwłaszcza drzewa, wytwarzają w gruncie w okresach bezopadowych wysokie wartości ciśnienia ssania, co poprawia stateczność zboczy. Natomiast wyniki badań Lim'a i in. [1996] oraz Garg i in. [2015] nie wskazują jednoznacznie na ile wpływ roślinności w okresach opadowych jest korzystny na stan naprężeń w gruncie. W pracach tych przedstawione są przypadki, w których ci-

śnienie ssania w gruncie bez pokrywy roślinnej było większe niż ciśnienie w gruncie zadarnionym lub zadrzewionym, co jest zgodne z wynikami uzyskanymi w tej pracy, ale cytowani powyżej autorzy uzyskali również odwrotne zależności. Na wpływ pokrycia roślinności na stateczność zboczy zwrócił uwagę już Jakubowski [1965]. Zauważył on, że tereny łąkowe są zdecydowanie bardziej predysponowane na ruchy masowe w obrębie mas zwietrzelinowych niż tereny leśne czy uprawne, co znajduje potwierdzenie w otrzymanych wynikach obliczeń.

W celu wyjaśnienia przyczyn zróżnicowanych wyników obliczeń współczynnika bezpieczeństwa dla przyjętych wartości wskaźnika LAI przeanalizowano wyniki obliczeń bilansu wodnego związanego z dystrybucją wody opadowej. Do porównania uwzględniono te przypadki, w których intensywność opadu była stała, a ilość opadu prowadząca do naruszenia stateczności zbocza była zbliżona dla każdej wartości LAI i mieściła się w granicach od 342 do 367 mm. Należy zwrócić uwagę, że największe różnice w bilansie wodnym były związane z wielkością retencji (ilość wody zatrzymanej w trakcie opadu w profilu gruntowym), której największą wartość uzyskano



Rys. 6. Wartości wybranych składników bilansu wodnego w zależności od wskaźnika pokrycia liściowego LAI  
 Fig. 6. Water balance calculation results vs. values of leaf area indexes LAI



dla zbocza, którego pokrycie odpowiadało LAI=0 (50%), nieco mniej dla LAI=5 (wartość 48%), a najmniej dla LAI=3 (wartość 44%). Otrzymane zależności dla zbocza, którego pokrycie wyniosło LAI=0, stoi w sprzeczności z powszechnie panującym poglądem, że tereny pokryte roślinnością charakteryzują się dużą retencją. W analizowanym przypadku uzyskana zależność wynika prawdopodobnie z przyjętych parametrów obliczeniowych pokryw stokowych. W obliczeniach przyjęto, że niezależnie od założonej wartości LAI, porowatość i wodoprzepuszczalność gruntów pokryw stokowych są identyczne. W praktyce jednak obecność korzeni w gruncie wpływa na zwiększenie porowatości gruntu i jego wodoprzepuszczalności [Najder 2003]. Z kolei analizując wielkość parowania terenowego zauważalne jest, że największą jego wartość (26%) uzyskano przy LAI=3, co było związane z dużą wyjściową wilgotnością gruntów zbocza (niższymi wartościami ciśnienia ssania), a tym samym z większą dostępnością wody dla roślin.

## WNIOSKI

Otrzymane wyniki obliczeń stateczności analizowanego zbocza wskazują, że wartość opadu progowego wywołującego powstanie osuwisk zależała od wilgotności gruntu, intensywności i czasu trwania opadu, ale także od pokrycia terenu roślinnością opisywaną wskaźnikiem pokrycia liściowego LAI. Obliczenia przepływu wody w gruncie wskazują na istotne znaczenie wskaźnika pokrycia liściowego LAI na kształtowanie się wilgotności gruntów zbocza. Wartości LAI z zakresu 1–3, odpowiadające roślinności trawiastej, sprzyjają w dłuższej perspektywie czasu większemu gromadzeniu się wody gruncie, co ogranicza jego zdolność retencji w momencie wystąpienia intensywnych opadów. Z kolei pokrycie terenu drzewami, odpowiadające wartości LAI=5, umożliwia wytworzenie dużego zapasu wilgotności w gruncie, co wpływa na opóźnienie reakcji gruntu na opady (utrata stateczności) w stosunku do terenu pokrytego roślinnością trawiastą.

Wyniki obliczeń wykazały również, że znaczący wpływ na wielkość opadu progowego miała też wilgotność gruntów zbocza przed rozpoczęciem intensywnych opadów. W przypadku analizowanego zbocza wielkość opadu progowego wynosiła od około 90 dla okresu mokrego do ponad 700 mm w okresie suchym. Czas

reakcji pokryw stokowych na opady jest odwrotnie proporcjonalna do ich intensywności, przy czym najkrótszy okres opadowy wywołujący naruszenie stateczności analizowanego zbocza wyniósł 3 doby i charakteryzował się sumaryczną wielkością 92 mm.

## LITERATURA

1. Baldocchi D. 2012. Lecture 2: Characterizing the Vegetation Canopy, Part II: Leaf Area Index. University of California, Berkeley.
2. Cornforth D.H., 2005. Landslides in practice. John Wiley & Sons, INC, ss. 591.
3. Demczuk P., Zydroń T., Siłuch M., Klimek M. 2016. Rainfall-thresholds for occurrence of shallow landslides in the south of Poland – example of slopes in Nowy Wiśnicz Commune. UMCS, Lublin, ms.
4. Garg A., Coe J.L., Ng C.W.W. 2015. Field study on influence of root characteristics on soil suction distribution in slopes vegetated with *Cynodon dactylon* and *Schefflera heptaphylla*. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40, 1631–1643.
5. GEO-SLOPE 2010a: Vadose Zone Modeling with VADOSE/W 2007. An Engineering Methodology (4<sup>th</sup> ed.). Alberta: GEO-SLOPE International Ltd.
6. GEO-SLOPE 2010b: Stability modeling with SLOPE/W 2007: An Engineering Methodology (4<sup>th</sup> ed.). Alberta: GEO-SLOPE International Ltd.
7. Gil E. 1997. Meteorological and hydrological conditions of landslides, Polish Flysch Carpathians. *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica*, vol. XXXI, 143–158.
8. Gil E., Długosz M., 2006, Threshold values of rainfalls triggering selected deep-seated landslides in the Polish Flysch Carpathians, *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica*, 40, 21–43.
9. Gorczyca E., 2004. Przekształcanie stoków fliszowych przez procesy masowe podczas katastrofalnych opadów (dorzecze Łososiny). Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, ss. 101.
10. Jakubowski J. 1965. Wpływ pokrycia roślinnego oraz opadów atmosferycznych na powstawanie osuwisk zwietrzelinowych. *Przegląd Geologiczny*, 13, 9, 395–398.
11. Glade T., Anderson M., Crozier M. J., (eds.) 2005. *Landslide risk assessment*. John Wiley & Sons, INC, ss. 832.
12. Greenway D.R. 1987. *Vegetation and Slope Stability*. [W:] M.G. Anderson, K.S. Richards (red.), *Slope stability*, 187–230, Wiley and Sons, New York.

13. Herse J., 1981. Szczegółowa uprawa roślin. PWN, Warszawa, ss. 622.
14. Ishak M.F., Ali N., Kassim A., 2013. The influence of tree induce suction on soil suction profiles. *IJRET: International Journal of Research in Engineering Technology*, 2 (9), 187–193.
15. Lim T.T., Rahardjo H., Chang M.F., Fredlund D.G., 1996. Effect of rainfall on matric suctions in a residual soil slope. *Can. Geotech. J.*, 33, 618–628.
16. Najder T. 2003. Wpływ roślinności na zmiany stateczności zboczy. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 2, 86–92.
17. Ng C.W.W., Leung A.K., Garg A., Woon K.X., Chu L.M., Hau B.C.H., 2013a. Soil suction induced by grass and tree in an atmospheric-controlled plant room. *Proceedings of the 18<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, 1167–1170.
18. Ng C.W.W., Woon K.X., Leung A.K., Chu L.M., 2013b. Experimental investigation of induced suction distribution in a grass-covered soil. *Ecological Engineering*, 52, 219–233.
19. PN-EN ISO 14688–2:2006. Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania. PKN, Warszawa.
20. Simon A., Collison A.J.C., 2002. Quantifying the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on streambank stability. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27, 527–546.
21. Wilson G.W., 1990. Soil evaporative fluxes for geotechnical engineering problems. Ph.D. Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, ss. 464.