

Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska nr 4 (50), 2010: 36–47  
(Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. 4 (50), 2010)  
Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences No 4 (50), 2010: 36–47  
(Sci. Rev. Eng. Env. Sci. 4 (50), 2010)

**Eugeniusz KODA<sup>1</sup>, Piotr OSIŃSKI<sup>1</sup>, Marian GŁAŻEWSKI<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Katedra Geoinżynierii SGGW w Warszawie

Department of Geotechnical Engineering WULS – SGGW

<sup>2</sup> Instytut Budownictwa, Mechanizacji i Elektryfikacji Rolnictwa, Warszawa

Institute of Building Mechanization and Electrification of Agriculture, Warsaw

## **Agrogeotechniczne umacnianie skarp budowli ziemnych** **Agrogeotechnical improvement of earth structure slopes**

**Słowa kluczowe:** skarpy ziemne, erozja wodna, rośliny do stabilizacji skarp

**Key words:** earth slopes, water erosion, vegetation for slope stability

### **Wprowadzenie**

Skarpy są narażone na przyspieszoną erozję wodną, głównie w trakcie budowy i wstępnej eksploatacji. Szkodliwy wpływ wody spływającej z korony skarpy jest obserwowany od dawna, praktycznie przy realizacji wszystkich nasypów ziemnych (tras komunikacyjnych, wałów przeciwpowodziowych, grobli i zapór ziemnych, obwałowań składowisk mokrych). Z obserwacji wynika, że przy wykonywaniu robót wykończeniowych i rekultywacyjnych można sprowadzić do minimum zakres robót związanych z usuwaniem zniszczeń erozyjnych. Przy projektowaniu skutecznego zabezpieczenia skarp należy uwzględnić

przede wszystkim nachylenie i wysokość skarpy oraz warunki gruntowe. Skarpy budowli ziemnych wymagają zabezpieczenia z wykorzystaniem odpowiednio dobranej roślinności, zanim wytworzy się zadarnienie naturalne.

Istotne znaczenie przy projektowaniu umocnień ma uwzględnienie w analizie stateczności wpływu korzeni roślin na warunki stateczności skarp. W artykule przedstawiono algorytm postępowania w tym zakresie, wprowadzający dodatkowe dane do analizy stateczności skarpy.

Docelowe zadarnienie skarp powinno być poprzedzone odpowiednim przygotowaniem podłoża gruntowego. Niedostateczne zagęszczenie gruntu w nasypie uwidacznia się poprzez pogarszanie warunków stateczności skarp i wytrzymałości podłoża. Coraz trudniejsze są też warunki budowy spowodowane przechodzeniem ważnych tras

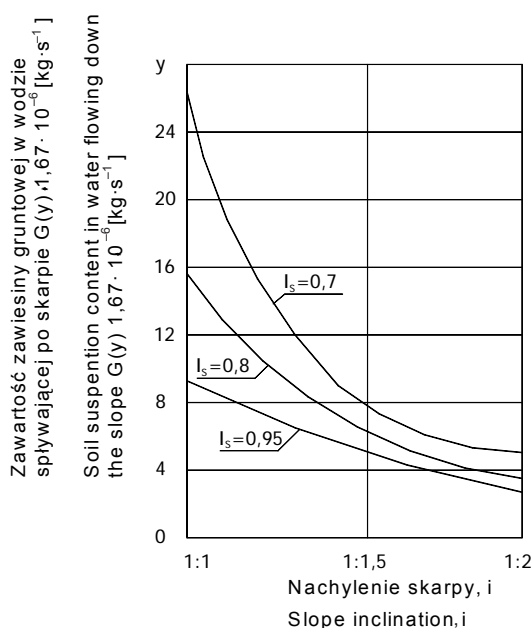
komunikacyjnych przez doliny rzek oraz koniecznością ochrony gruntów rolnych i leśnych. Istotne jest, aby skutecznie chronić powierzchnie skarp przed działaniem czynników denudacyjnych w każdym etapie procesu inwestycyjnego (Głazewski i Koda 2010).

### Wymagania dotyczące zagęszczenia nasypów i skarp

Stan zagęszczenia gruntu, oprócz geometrii skarpy (kąt nachylenia i długość zbocza/skarpy), należy do najważniejszych czynników wpływających na intensywność zniszczeń erozyjnych (rys. 1), dlatego odpowiednie wbudowanie gruntu warunkuje jej późniejszą stabilność i stwarza warunki siedliskowe do

uzyskania dobrego zadarnienia. Wraz ze zwiększeniem pochylenia powiększa się powierzchnia gromadzenia i ilość spływającej wody, a także prędkość strumienia, czyli jego energia kinetyczna (Jewgieniew i Sawin 1989).

Technologia zagęszczania gruntu (miąższość warstw do jednorazowego zagęszczenia, rodzaj i liczba przejazdów sprzętu zagęszczającego) powinna być dostosowana do jego rodzaju i zakresu robót ziemnych. Dla dużej ilości robót ziemnych wskazane jest dobranie technologii zagęszczania na podstawie badania na nasypach próbnych (Roboty ziemne 1996). Odbiór zagęszczanych warstw gruntu powinien być dokonywany na podstawie badań kontrolnych z wykorzystaniem metod stosowanych w geotechnice.



Równania krzywych określających zależność G od pochylenia skarpy, i

Curves equations describing relation between G and slope inclination, i

$$\text{dla } I_s = 0,7; G(y) = 94,16 + 280i + 96,32i^2$$

$$\text{dla } I_s = 0,8; G(y) = 32,86 + 74,72i + 108i^2$$

$$\text{dla } I_s = 0,95; G(y) = 213,6 + 712,9i + 749,3i^2$$

RYSUNEK 1. Zależność między ilością gruntu unoszonego z wodami opadowymi a nachyleniem skarpy i wskaźnikiem zagęszczenia ( $I_s$ ) – Jewgieniew i Sawin (1989)

FIGURE 1. Relation between soil quantity from rainwater erosion and slope inclination and compaction index ( $I_s$ )

Przy budowie nasypów ziemnych wymagane jest zagęszczanie przy wilgotności optymalnej gruntu określonej w badaniu Proctora. Przy wilgotności optymalnej gruntu zjawiska erozji wietrznej nie występują, a jeśli są, to tylko w niewielkim zakresie, nawet jeśli nasyp jest zbudowany z gruntów/materiałów podatnych na unoszenie przez wiatr, takich jak popioły lotne lub mieszanki popiołowo-żużlowe (Koda i Głazewski 2006 i 2007).

Wymagane minimalne wskaźniki zagęszczenia skarp korpusu drogowego, zgodnie z wytycznymi i normami branżowymi, powinny wynosić  $I_s \geq 0,95(092)$ , w normie zaś BN-83/8959-01 podano, że dla gruntów spoistych wskaźnik zagęszczenia  $I_s \geq 0,92(0,90)$ , a dla gruntów niespoistych stopień zagęszczenia  $I_D \geq 0,55$ . Ponadto w normie tej jest zapis: „Skarpy nasypu powinny mieć zagęszczenie takie same jak nasyp”. Według normy PN-S-02205:1998, wartość wskaźnika zagęszczenia dla pobocza i skarp drogowych powinna wynosić  $I_s \geq 0,95$ . Z przeprowadzonych badań na skarpach utworzonych z gruntów jałowych stwierdzono, że podłoże pod warstwą urodzajną wyjątkowo dla skarpi o wystawie północnej może mieć minimalny wskaźnik zagęszczenia  $I_s \geq 0,90$ .

### **Erozja skarpi i zabiegi przeciwerozyjne**

Erozja powierzchniowa budowli ziemnych jest czynnikiem hydromechanicznego naruszenia struktury gruntu. Do erozji gruntu na skarpach dochodzi także wówczas, gdy ogólna i miejscowa stateczność skarpy jest w pełni zabezpie-

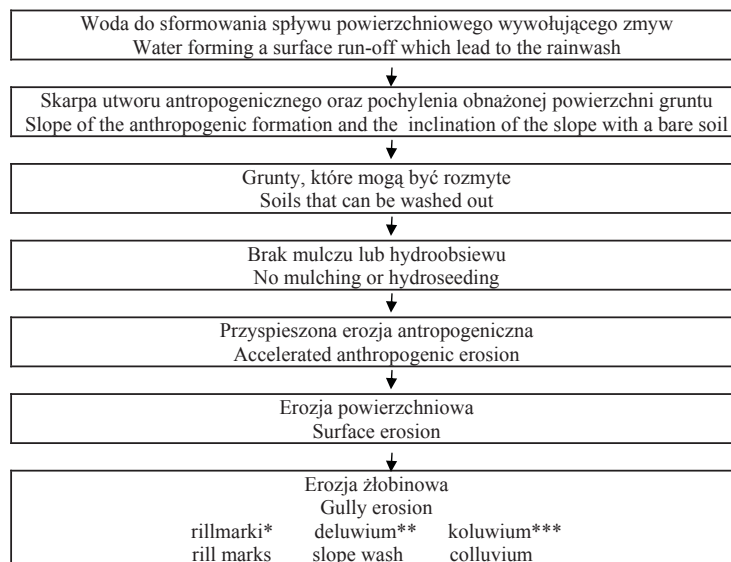
czona. Spływy wody ze skarpi przyczyniają się do powstawania tzw. antropogenicznej erozji przyspieszonej, której rozwój pokazano na rysunku 2, a schemat jej efektów na rysunku 3.

Erozja powierzchniowa wywołuje następujące szkody w otaczającym środowisku:

- niszczy wytworzone naturalnie lub sztucznie powierzchnie skarpi, w wyniku czego zwykle następuje zmniejszenie, a nawet utrata stateczności ogólnej nasypu oraz deformacja jego wyglądu pod względem estetycznym,
- wytworzone u podnóży skarpi i w miejscach odkładów usypiska z wyerodowanych cząstek gruntu zanieczyszczają przyległe pola i utrudniają właściwe ich odwodnienie,
- mieszane z wodą lub z wiatrem cząsteczki gruntu zamulają zbiorniki wodne i czynią szkody w faunie wodnej (przy projektowaniu bierze się pod uwagę tylko zagadnienia miejscowej stateczności – soliflukcja i osuwiska).

Z nieumocnionych skarpi i zboczy, nawet bez uwzględnienia skupisk uszkodzeń spowodowanych rozmyciem, z każdego hektara spływa od 150 do 200 m<sup>3</sup> gruntu na rok (Morgan 1991). Zmniejszenie podatności erozyjnej gruntów (gleb) i tym samym ograniczenie lub wyeliminowanie szkód związanych z tym procesem jest możliwe przy zastosowaniu zabiegów agrogeotechnicznych, które powinny być dobrane w zależności od warunków miejscowych i dostosowane do skali zagrożenia erozją.

W budownictwie ziemnym mogą być zastosowane następujące zabiegi agrogeotechniczne (Głazewski i Piechowicz 2009):



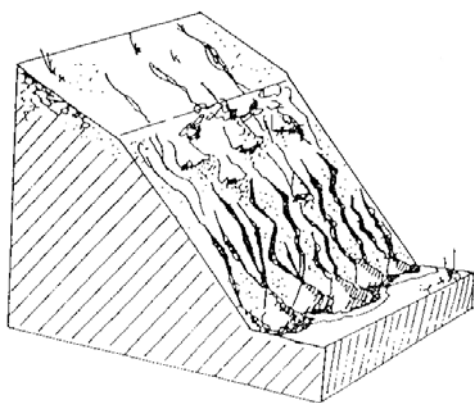
\*Rillmarki – utrwalone w piasku lub mule ślady spływania wody po powierzchni pochyłej.

\*\*Deluwium – osad tworzący się z pylastych cząstek mineralnych wypłukiwanych przez wody deszczowe z gleb, glin, lessów, pokrywający zbocza i osadziny w najniższych częściach.

\*\*\*Koluwium – osad powstały w wyniku przemieszczania się cząstek gruntu z góry na dół skarpy.

RYSUNEK 2. Powstawanie antropogenicznej erozji przyspieszonej (Głazewski 2005)

FIGURE 2. Genesis of accelerated anthropogenic erosion



RYSUNEK 3. Efekty wystąpienia nagminnej erozji przyspieszonej na skarpie

FIGURE 3. Results of intensive accelerated erosion on slopes

- likwidacja rillmarek, czyli usunięcie drobnych rynienek erozyjnych o głębokości  $\leq 10$  cm,
- bezpośredni siew rzutowy krzyżowy wybranych mieszanek traw i roślin motylkowatych,
- humusowanie z uprzednim wykonaniem poziomych bruzd, naniesieniem ziemi urodzajnej, dogęszczeniem naniesionej warstwy, siew rzutowy krzyżowy dobranych kompozycji nasion traw i roślin motylkowatych oraz moletowanie obsianych powierzchni,
- hydromechaniczne naniesienie warstw użyźniająco-przeciwoerozyjnych (mulczowanie, hydromulczowanie) z zastosowaniem odpowiednich do warunków miejscowych środków nośnych (mediów) oraz

- mieszanek nasion traw i roślin motylkowatych oraz obsiew,
- darniowanie w kratkę z humusowaniem i hydroobsiew (preferowane),
- zastosowanie geosyntetyków, humusowanie i obsiewy,
- wykonanie płotków faszynowych wypełnionych ziemią urodzajną i obsiane ręcznie lub z wykorzystaniem hydroobsiewu (preferowane).

Niektóre z zabiegów agrogeotechnicznych mogą być łączone, inne stosowane oddzielnie w zależności od warunków miejscowych. Efektem zastosowania zabiegów agrogeotechnicznych jest uzyskanie zwartej szaty roślinnej, pod warunkiem, że zostaną poczynione odpowiednie kroki umożliwiające jej prawidłowy rozwój i pielęgnację.

Umocnienie skarp drogowych należy projektować, uwzględniając zagrożenia związane z niekorzystnymi warunkami gruntowo-wodnymi. Skarpy stanowią ważny czynnik wpływający na bezpieczeństwo ruchu drogowego, dlatego zastosowane rozwiązanie powinno charakteryzować się wysokim stopniem skuteczności (Głazewski i Kalotka 1999).

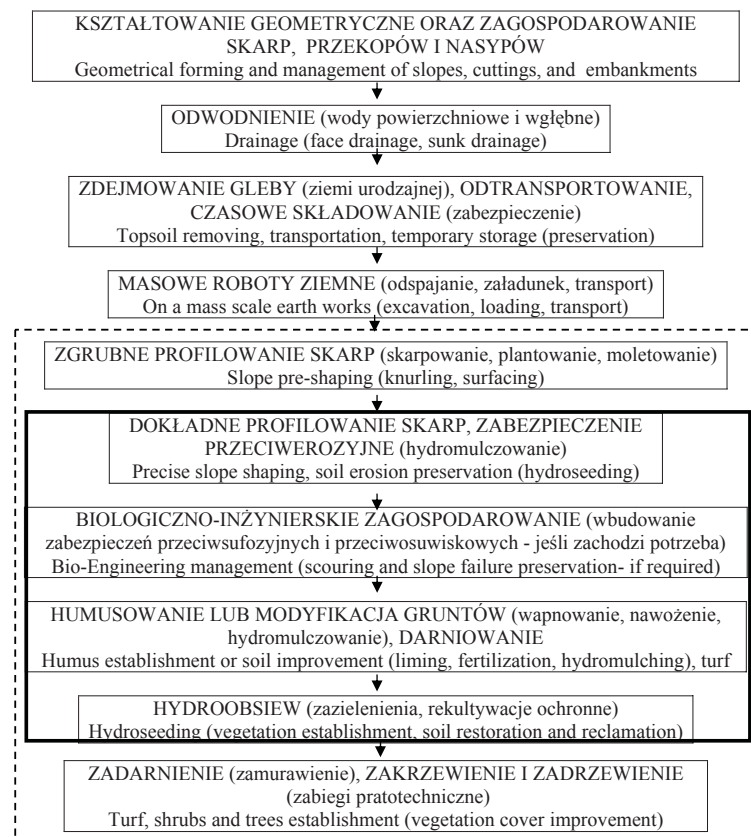
W uzasadnionych przypadkach wykonywania robót ziemnych, zwłaszcza w okresach późnojesiennych, a nawet lekkich zim, jako umocnienie skarp należy stosować: konstrukcje inżynierskie (np. ściany oporowe, przypory, grunt zbrojony), geosiatki, georuszty, geowłókniny itp., domieszki stabilizatorów chemicznych (wapno, cement, substancje jonowymiennie), ażurowe konstrukcje betonowe, urządzenia osuszające lub umacniające (np. drenaże, maty, geosyntetyki), hydroobsiew lub hydromulczowanie.

Celem zabiegów agrogeotechnicznych jest uzyskanie zwartej szaty roślin-

nej, pod warunkiem, że zostaną poczynione odpowiednie kroki umożliwiające jej prawidłowy rozwój. Dla pełnego zobrazowania czynności dotyczących kształtowania skarp z zastosowaniem hydroobsiewu na rysunku 4 przedstawiono proponowany algorytm postępowania.

### **Warunki wprowadzenia szaty roślinnej na skarpy (zabiegi pratotechniczne)**

Roślinność jest szeroko stosowana w budownictwie ziemnym jako sposób redukcji negatywnego wpływu prac inżyniersko-budowlanych na środowisko i poprawę estetyki krajobrazu. Może ona również odgrywać ważną rolę z powodu swojego bezpośredniego wpływu na glebę – zarówno na powierzchni (zadarniając i umacniając), jak i na głębokości – zwiększając poprzez zwarty system korzeniowy wytrzymałość na ścinanie ośrodka gruntowego. Wegetacja może także bardzo znacząco wpływać na wilgotność gruntu. Zagadnienie stateczności, prawidłowego utrzymania i estetyki skarp wszelkich komunikacyjnych budowli ziemnych, zwałowisk utworów antropogenicznych (składowisk odpadów przemysłowych), w głównej mierze koncentruje się wokół podstawowego zagadnienia, na przykład wybudowania drogi, torowiska, wału przeciwpowodziowego, ziemnego muru oporowego, a najmniejsze zaangażowanie uwidacznia się przy pracach uznanych za mniej ważne przy formowaniu skarp. Skarpy przed humusowaniem powinny być przygotowane z wykorzystaniem zasad robót ziemnych, szczególnie dotyczących doboru odpowiedniego materiału i uzyskania



Objaśnienia: ————— – konieczne zabezpieczenie przeciwerozyjne (hydroobsiew)  
 Explanations: ————— – required soil erosion preservation (hydroseeding)  
 - - - - - – zalecane zabezpieczenie przeciwerozyjne (hydromulczowanie)  
 - - - - - – recommended soil erosion preservation (hydromulching)

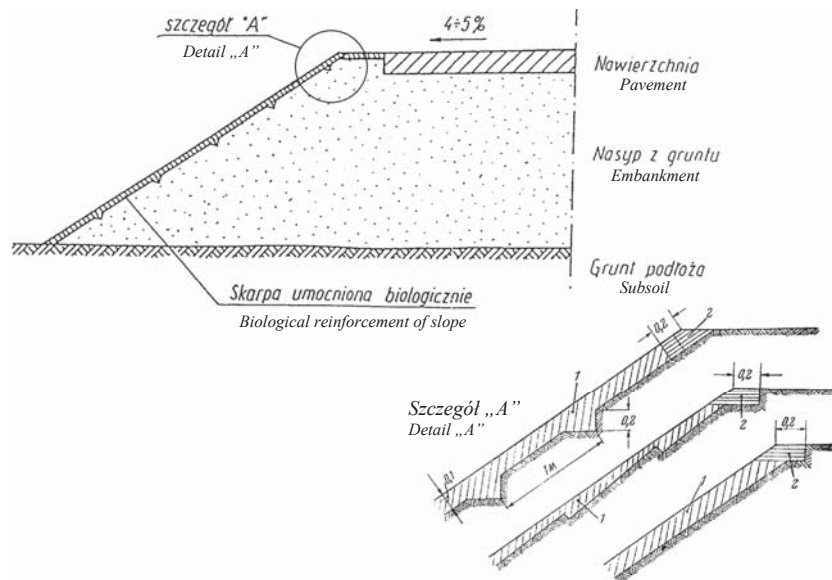
RYSUNEK 4. Czynności przy formowaniu gruntów na pochyłościach > 3% (Głazewski 2003)  
 FIGURE 4. Activities during building in soils on slopes with inclination > 3%

wymaganego stanu zagęszczenia (Roboty ziemne 1996). Sposób przygotowania powierzchni skarpy (zbocza) do humusowania przedstawiono na rysunku 5.

Nowoczesne środki do biologicznego umacniania niestabilnych powierzchni na zboczach i skarpach powinny spełniać następujące wymogi: skutecznie stabilizować grunty (również na okoliczność deszczy nawalnych), ograniczać zabiegi agrotechniczne i pratotechniczne

(podsiew, użyźnianie i koszenie), przyczyniać się do poprawy zasobności nawozowej i stosunków wodnych gruntu, zmniejszać funkcję stabilizatora gruntu w miarę rozwoju okrywy roślinnej, nie wносить do gruntu elementów niekorzystnych lub uciążliwych dla środowiska.

Najbardziej odporne ze wszystkich roślin na działanie zanieczyszczeń, na przykład pochodzących z dróg, są trawy. Dlatego często wykorzystywane są



RYSUNEK 5. Tradycyjne sposoby przygotowania powierzchni skarpy do humusowania  
 FIGURE 5. Conventional methods of soil management for humus on slopes

do zagospodarowania terenów, które są szczególnie narażone na zanieczyszczenia. Dziko rosnące gatunki i ekotypy traw pochodzenia lokalnego ze względu na trudności w pozyskaniu nasion nie mają większego znaczenia dla zagospodarowania stref ochronnych. Dlatego też stosowane są rozmaite uprzednio sprawdzone mieszanki (kompozycje) traw i roślin motylkowatych drobnonasiennych (Ziaja 1993).

Podstawowymi warunkami intensywnej vegetacji traw (Dzierżawski i in. 1990) są korzystne stosunki wodne i pokarmowe oraz minimalna zawartość substancji toksycznych w środowisku glebowym. Tego rodzaju warunki można stworzyć niemal wszędzie, nawet przy dużych nachyleniach i przy znacznych koncentracjach zanieczyszczeń w przyziemnej części atmosfery. Roślinność przeznaczona do tego celu powinna speł-

niać następujące warunki: szybko rosnać w celu zabezpieczenia powierzchni skarpy, posiadać dobrze rozwinięty system korzeniowy, który dodatkowo wzmacnia podłoże, tworzyć trwałą i zwartą pokrywę roślinną w ciągu całego roku, mieć niewielkie wymagania pokarmowe, nie wymagać częstego koszenia, posiadać dużą odporność na zmienne warunki pogodowe.

Trawami, które spełniają te wymagania i mogłyby wytworzyć murawy, są trawy niskie, posiadające dobrze rozwinięty i gęsty system korzeniowy, tym samym tworząc zwartą obudowę roślinną. Gatunki podstawowe, z których można komponować mieszanki do obsiewu skarp drogowych z przeznaczeniem na murawy, to: kostrzewa czerwona rozłogowa (*Festuca rubra genuina* Hack), kostrzewa owcza (*Festuca ovina* L.) kępowa, kostrzewa różnolistna (*Fe-*

*stuca heterophylla* Lam.) luźnokępowa, mietlica biaława (*Agrostis alba* L.) rozłogowo-luźnokępowa, mietlica pospolita (*Agrostis vulgaris* With lub *Agrostis tenuis* Sib.) rozłogowo-luźnokępowa, wiechlina łąkowa (*Poa pratensis* L.) rozłogowo-luźnokępowa, życica trwała (*Lolium perenne* L.), zwana też rajgrasem angielskim, luźnokępowa.

Oprócz wymienionych traw gatunkami włączonymi w skład mieszanek przeznaczonych do obsiewu skarp są rośliny motylkowate drobnonasienne: komonica różkowa (*Lotus corniculatus* L.), konieczyna biała (*Triforium regens* L.), lucerna nerkowata (*medicago lupulina* L.).

Skład gatunkowy mieszanek dobiera się stosownie do istniejących lub specjalnie ukształtowanych warunków glebowych, funkcji roślinności darniowej i ekspozycji skarp. Funkcje zadarnionych powierzchni są zróżnicowane w zależności od przeznaczenia, począwszy od trawników ozdobnych do skarp kanałów (skarpy, użytki ekologiczne w strefach przydrożnych) – Mellor (2003). W pierwszym przypadku wprowadza się te rośliny, które najlepiej w danych warunkach spełniają wymagania zieleni trawnikowej. W drugim przypadku wystarcza darń, chroniąca glebę przed niszczącym działaniem wody i wiatru.

oparta jest na tak zwanej metodzie „blokowej” (Wiłun 2000). Polega ona na wyznaczeniu powierzchni poślizgu zbocza, która od góry ograniczona jest konturem skarpy, od dołu natomiast potencjalną powierzchnią poślizgu. Tak otrzymaną bryłę należy podzielić na kilka bloków o prostopadłych ścianach, dla których rozpatrywany jest stan równowagi, działających na nie sił. Analizy stateczności oparte na metodzie blokowej to m.in. metody: Bishopa, Janbu, Morgenstern-Prize, Corps of US Engineers czy Spencera. W metodach tych ocena stateczności zbocza wyrażona jest jako bezwymiarowy współczynnik stateczności ( $F$ ). Uwzględnia on siły ciężkości i parcia, oddziałujące między poszczególnymi blokami, właściwości mechaniczne gruntu oraz siły działające na skutek występowania wód gruntowych. Opierając się na metodzie „blokowej”, przy uwzględnieniu dodatkowych sił, jednakowe obliczenia przeprowadzić można dla skarp, na których występuje roślinność (rys. 6). Takie założenia przyjmuje Greenwood General Method – GGM (Greenwood 2006), której równanie przyjmuje następującą postać:

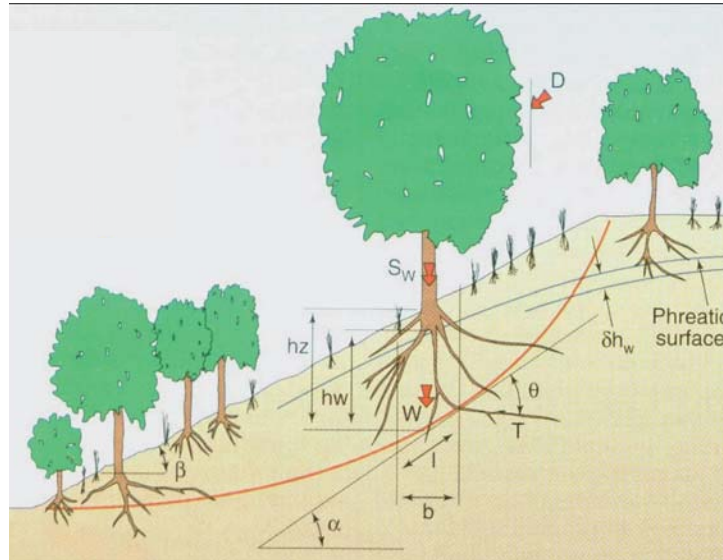
$$F = \frac{\Sigma[(c' + c'_v)l + ((W + W_v) \cos \alpha - (u + \Delta u_v)l - ((U_2 + \Delta U_{2v}) - (U_1 + \Delta U_{1v})) \sin \alpha - D_w \sin \alpha (\alpha - \beta) + T \sin \Theta) \tan \phi']}{\Sigma[(W + W_v) \sin \alpha + D_w \cos(\alpha - \beta) - T \cos \Theta]}$$

### Analiza stateczności skarpy z uwzględnieniem okrywy roślinnej

Większość metod obliczeniowych do wyznaczania stateczności zboczy

Elementy równania (odnoszące się do poszczególnego bloku rozpatrywanej powierzchni poślizgu), które uwzględniają wpływ roślinności na otrzymany współczynnik stateczności, to odpowiednio:  $c_v$  [ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$ ] – do-





RYSUNEK 6. Uwzględnienie roślinności w obliczeniach stateczności skarpy (Assesing the Contribution... 2004)

FIGURE 6. The influence of vegetation on slope stability calculation

datkowa siła kohezji, która występuje w przypadku, gdy system korzeniowy jest na tyle rozwinięty, aby zmienić spójność gruntu, dotyczy to również zastosowania wzmocnienia skarpy przy użyciu na przykład geosyntetyków;  $W_v$  [kN] – dodatkowe obciążenie od masy roślinności (w szczególności duże drzewa), co uwzględnione jest w ciężarze gruntu dla poszczególnego bloku;  $\Delta U_v$  [kN] – zmiana ciśnienia hydrostatycznego związana ze zmianą stosunków wodno-gruntowych, które mogą ulec zmianie w przypadku, gdy system korzeniowy zmienia strukturę gruntu lub zmienia poziom wody gruntowej;  $D_w$  – wpływ siły wiatru i jego kąta działania (w przypadku drzew o rozłożystej i gęstej koronie (więcej silny wiatr może przyczynić się do znacznej destabilizacji gruntu);  $T$  [kN] – wytrzymałość korzenia na rozciąganie (podczas tworzenia się po-

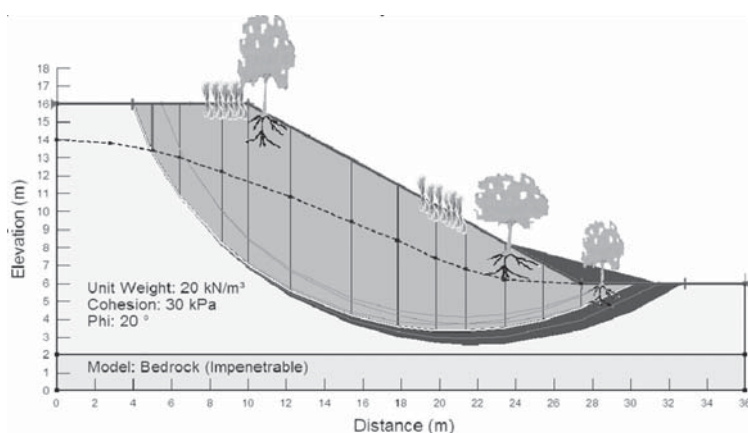
tencjalnego osuwiska);  $\Theta$  [°] – kąt jego położenia względem podstawy rozpatrywanego bloku. Wartość  $T$  w równaniu Greenwooda (2006) jest elementem, na który współczynnik stateczności wykazuje największą wrażliwość. Pomiary rozciągłości wykonuje się w laboratorium bądź też za pomocą specjalnego aparatu (Root Pull-out/Shear apparatus), pomiar taki może zostać wykonany w terenie. W zależności od gatunku i stopnia dojrzałości rośliny wytrzymałość korzenia na rozciąganie może zawierać się między 4 a 90,5 MPa dla olszy (Anderson i Richards 1987).

W przypadku obliczeń stateczności zbocza naturalnego lub skarpy ziemnej budowli inżynierskiej najistotniejszym, a zarazem najbardziej pracochłonnym zadaniem jest wyznaczenie krytycznej powierzchni poślizgu skarpy. Najczęściej jest to realizowane przy użyciu mo-

deli komputerowych, dzięki którym powierzchnia poślizgu, dla którego współczynnik stateczności jest najmniejszy, generowana jest przez software. Do zadań projektanta należy ocena, jak duże jest prawdopodobieństwo wystąpienia wygenerowanego osuwiska. Na rysunku 7 przedstawiona została graficzna symulacja powstania osuwiska przy zadanych warunkach gruntowo-wodnych oraz

przy występowaniu okrywy roślinnej na skarpie nasypu. W tabeli 1 przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń współczynnika stateczności dla odsłoniętych skarp nasypów oraz dla skarp pokrytych roślinnością. Obliczenia zostały wykonane przy użyciu wyżej opisanej metody Greenwood General Method (GGM).

Pomimo że zaprezentowane w tabeli 1 wyniki wykazują poprawę stateczności



RYSUNEK 7. Wpływ okrywy roślinnej na stateczność zbocza, współczynnik stateczności obliczony za pomocą GGM, geometria powierzchni poślizgu wyznaczona przy użyciu GeoStudio2007 (Osiński 2010)

FIGURE 7. The influence of vegetation distribution on slope stability, FOS calculated by using GGM, the geometry of the failure surface computed by GeoStudio2007

TABELA 1. Zmiana współczynnika stateczności po uwzględnieniu wpływu roślinności (Osiński 2010)

TABLE 1. Changes of Factor of Safety according to vegetation presence (Greenwood General Method)

Geometria skarpy Slope parameters	$H = 10 \text{ m}, \beta = 40^\circ$		$H = 8 \text{ m}, \beta = 40^\circ$		$H = 6 \text{ m}, \beta = 40^\circ$	
Parametry gruntowe Soil parameters	$\gamma = 18 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}, c = 10 \text{ kPa}, \varphi = 20^\circ$		$\gamma = 18 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}, c = 10 \text{ kPa}, \varphi = 20^\circ$		$\gamma = 18 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}, c = 10 \text{ kPa}, \varphi = 20^\circ$	
Obecność roślin Vegetation cover	no veg.	veg.	no veg.	veg.	no veg.	veg.
Współczynnik stateczności, $F$ Factor of safety	1,01	1,14	1,13	1,26	1,36	1,56

Objaśnienia: no veg. – brak okrywy roślinnej; veg. – obecność okrywy roślinnej.

skarpy (wzrost współczynnika stateczności o 15–20%), to błędny dobór roślinności na skarpy oraz jej niepoprawne rozmieszczenie i brak pielęgnacji mogą spowodować znaczne pogorszenie warunków stateczności zbocza, a w niektórych przypadkach przyczynić się do powstania osuwiska.

### Podsumowanie i wnioski

Dla zabezpieczenia przeciwoerozyjnego skarpy podstawowe znaczenie ma odpowiednie zagęszczenie gruntu i stworzenie warunków dla rozwoju roślinności.

Wybór sposobu umocnienia poboczy gruntowych oraz skarpy do czasu wytworzenia się nawierzchni trawiastych, tj. humusowania, hydroobsiewu, darniowania, dywanów trawiastych, biowłókniny, powinien zależeć od rodzaju gruntów, kątów nachylenia skarpy, warunków siedliskowych oraz zaangażowanych środków technicznych i finansowych.

Analiza stateczności skarpy pokrytych roślinnością powinna uwzględniać wpływ roślin na warunki obliczeń. Dobrze porośnięta skarpa może mieć współczynnik stateczności większy o 15–20% niż skarpa bez roślin. Należy jednak pamiętać, że źle dobrana roślinność może również pogorszyć warunki stateczności skarpy.

### Literatura

- ANDERSON M.G., RICHARDS K.S. 1987. Slope Stability: Geotechnical Engineering and Geomorphology. John Wiley and Sons, New York.
- BN-83/8959-01 Urządzenia melioracji wodnych. Nasypy. Wymagania i badania.
- DZIERŻAWSKI K., GŁAŻEWSKI M., MAKOWSKI J. 1990: Ingenieurbiologische Bepflanzung der Böschungen – Dynamische Hydrosaat mit Anwendung der Abwasserablagerungen. *Prace Instytutu Badawczego Dróg i Mostów* 1: 87–97.
- GŁAŻEWSKI M. 2003: Hydroobsiew jako metoda ochrony przeciwoerozyjnej pochyłych powierzchni utworów antropogenicznych. Rozprawa doktorska. IMBER, Warszawa.
- GŁAŻEWSKI M., KALOTKA J. 1999: Hydrodynamic seeding with the use of sewage sludge and fly-ash for slope protection. Intern. Symp. on Slope Stability Engineering, Shikoku/Japan 2: 925–930.
- GŁAŻEWSKI M., KODA E. 2010: Agrogeotechniczne wymogi w projektowaniu, budowie i eksploatacji skarpy i poboczy drogowych. Seminarium Skarpy Drogowe. IBDiM, Warszawa: 193–216.
- GŁAŻEWSKI M., PIECHOWICZ K. 2009: Budowa i umocnienie przeciwoerozyjne skarpy drogowych. *Drugi i Mosty* 2: 5–31.
- GREENWOOD J.R. 2006: SLIP4EX – A Program for Routine Slope Stability Analysis to Include the Effects of Vegetation, Reinforcement and Hydrological Changes. *Geotechnical and Geological Engineering* 24 (3): 449–465.
- GREENWOOD J.R. et al. 2004: Assessing the Contribution of Vegetation to Slope Stability. *Journal of Geotechnical Engineering* 157 (4): 99–208.
- JEWGIENIEW I.E., SAWIN W.W. 1989: Zaszczepienie przyrodnej srody przystroitelstwie i soderzani awtomobilnych dorog. Transport, Moskwa.
- KODA E., GŁAŻEWSKI M. 2006: Technical and biological reinforcement of rebuilt landfill slopes. Proc. of the 13th Danube-Europ. Conf. on Geotechnical Engineering, Ljubljana 2: 275–280.
- KODA E., GŁAŻEWSKI M. 2007: Techniczno-biologiczna (hydroobsiew) stabilizacja skarpy z wykorzystaniem popiołów i osadów ściekowych. Popioły z energetyki. EKO-TECH, Szczecin.
- MELLOR D.R. 2003: The lawn bible. HYPERRION, New York.
- MORGAN R.P.C. 1991: Soil erosion and conservation. Longman Scientific and Technical, New York.

OSIŃSKI P. 2010: Guidelines for assessment of slope stability in small earth structures. MSc Thesis, Cranfield University.  
PN-S-02205:1998 Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania.  
Roboty ziemne. Wytyczne techniczne wykonania i odbioru, 1996. MOŚZNiL, Warszawa.  
WILUN Z. 2000: Zarys geotechniki. WKiŁ, Warszawa.  
ZIAJA W. 1993. Dobór traw i roślin do obsiewów pasa drogowego. *Drogownictwo* 1: 17–20.

duce vegetation onto slopes is the adequate compaction of built-in soils. Plants selection for slope stability ought to be adjusted to a kind of soils and side of slope. Improper soil preparation can cause intensive accelerated erosion on slopes. Slope stability should be analyzed taking into consideration the influence of existing vegetations. The presented results shows that simple activity like vegetation establishment can increase the factor of safety by as much as 20%.

## Summary

**Agrogeotechnical improvement of earth structure slopes.** The paper presents the problem of slope stability of embankments covered with vegetations. The main issue to intro-

### Author's address:

Eugeniusz Koda  
Katedra Geoinżynierii SGGW  
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa  
Poland  
e-mail: eugeniusz\_koda@sggw.pl