

dr hab. inż. Marian Łupieżowiec, prof. uczelni¹⁾
ORCID: 0000-0003-4863-2333

The influence of water runoff pressure on the stability of natural and engineering slopes

Wpływ ciśnienia spływowego wody na stateczność skarp i zboczy

DOI: 10.15199/33.2024.08.06

Abstract. A very common reason for the loss of stability of slopes is water pressure resulting from weather conditions or changes in water filtration in the ground. The force resulting from these pressures is usually one of the main factors initiating the loss of stability. Stability is also influenced by changes in the water level in the slope after heavy rains. Stability taking into account the impact of water can be simulated using the finite element method using the $c - \phi$ reduction method.

Keywords: slope stability; ground water; seepage pressure; atmospheric factors.

Streszczenie. Bardzo częstym powodem utraty stateczności skarp i zboczy jest ciśnienie wody pojawiające się wskutek warunków atmosferycznych lub zmiany filtracji wody w podłożu. Siła będąca skutkiem tego ciśnienia przeważnie stanowi jeden z głównych czynników inicjujących utratę stateczności, na którą ma wpływ również zmiana poziomu wody w zboczu po wystąpieniu ulewnych deszczy. Stateczność z uwzględnieniem oddziaływania wody można symulować metodą elementów skończonych, stosując metodę redukcji $c - \phi$.

Słowa kluczowe: stateczność skarp i zboczy; woda gruntowa; ciśnienie spływowe; czynniki atmosferyczne.

When performing a stability analysis, in the most general case, the mutual relationship of generalized sliding and holding forces (most often moments of forces) is considered. The measure of the safety margin is the safety F_s , which is the quotient of the above quantities. When the ratio of holding to sliding forces is greater than 1.0, it can be stated that the slope or escarpment is stable. Most often, it is required to obtain an appropriate value of F_s [1 ÷ 3], which is usually 1.3 – 1.5, although, for example, in the case of slopes of newly built railway embankments, it may be necessary to obtain as much as $F_s \geq 2.0$ [4]. When $F_s = 1.0$, we are talking about unstable equilibrium, while when $F_s < 1.0$, the slope is unstable and there is a very high probability (close to certainty) of a landslide or other form of loss of stability and causing movements of earth masses. The greatest influence on stability is primarily the height and inclination of the slope, as well as the condition and type of soils or rocks that make up the slope. In addition, stability is influenced by the load on the land or surface of the slope, the shape (e.g. the presence of relieving shelves), and the presence of old slide surfaces that may become active and cause another loss of stability in the future.

In order to provide the required safety margin, **protection of slopes or escarpments** is carried out. These include ground anchors and nails, palisades supporting the base of the slopes, stone riprap, gabion mattresses and many others. Sometimes it is necessary to make retaining structures, which can be made of concrete structures (massive), reinforced concrete structures (angle structures) or gabion walls, structures made

W wykonując analizę stateczności, w przypadku najbardziej ogólnym rozważa się wzajemną relację sił uogólnionych zsuwających i utrzymujących (najczęściej momentów sił). Miarą zapasu bezpieczeństwa jest współczynnik stateczności F_s (*safety factor*) będący ilorazem wymienionych wielkości. W przypadku, gdy stosunek sił utrzymujących do zsuwających jest większy od 1,0, to można stwierdzić, że zbocze lub skarpa są stateczne. Najczęściej wymaga się uzyskania odpowiedniej wartości F_s [1 ÷ 3], która zwykle wynosi 1,3 – 1,5, choć np. w przypadku skarp nowo budowanych nasypów kolejowych może być konieczne uzyskanie aż $F_s \geq 2,0$ [4]. Gdy $F_s = 1,0$, mówimy o równowadze chwiejnej, natomiast gdy $F_s < 1,0$, to skarpa jest niestateczna i zachodzi bardzo duże prawdopodobieństwo (graniczące z pewnością) wystąpienia osuwiska lub innej postaci utraty stateczności i wywołania ruchów mas ziemnych. Największy wpływ na stateczność ma wysokość i nachylenie skarpy, stan i rodzaj gruntów lub skał, które budują tę skarpe, a także obciążenie naziomu lub powierzchni skarpy, ukształtowanie (np. obecność półek odciążających) oraz obecność dawnych powierzchni poślizgu. Powierzchnie te mogą się uaktywnić i być przyczyną kolejnej utraty stateczności w przyszłości.

W celu zapewnienia wymaganego zapasu bezpieczeństwa wykonuje się **zabezpieczenia skarp lub zboczy**, stosując kotwy i gwoździe gruntowe, palisady podpierające podstawę skarpy, narzut kamienny, materace gabionowe i wiele innych. Niekiedy zachodzi konieczność wykonania konstrukcji oporowych betonowych (masywne) lub żelbetowych (konstrukcje kątowe) ewentualnie murów gabionowych, z gazonów itp. W przypadku skarp obiektów nowo budowanych (np. nasypy drogo-

¹⁾ Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa; marian.lupiezowiec@polsl.pl

of lawns, etc. In the case of slopes of newly built structures (e.g. road and railway embankments), protection is often provided by making an embankment of soil reinforced with geosynthetics [5, 6]. It should be noted that the type and method of construction of the structure, as well as the condition of the ground on which the structure will be built, have an impact on its stability.

A separate problem, which is very often observed in the occurrence of failures related to the loss of stability, is the **impact of water**. In particular, phenomena related to the movement of water have a very destructive effect on the maintenance of the equilibrium of the slope. Filtration of water causes the creation of downdraft pressure forces, which constitute additional interactions, which should most often be counted as sliding forces. In addition, water filtering in the ground can cause the phenomena of colmatation (filling of the space by small soil particles) or suffosion (taking out of small particles by water), which cause a change in the properties of the soil medium. Suffosion is particularly dangerous, which is often observed when flood embankments lose their stability. In addition, the exposure of the slope surface to weather conditions (especially heavy rain) affects the deterioration of the mechanical properties of the soil. This is where the frequently observed landslides occurring after heavy rainfall result from.

Although the literature presents many methods of stability analysis and estimation of the value of the safety factor, the impact of the downdraft pressure is often omitted, which is a very difficult issue to take into account and is rarely taken into account in engineering practice. In order to properly take into account the downdraft pressure, it is necessary to perform analyses based on the finite element method and to assume a two-component soil medium, which allows for simulation of the soil skeleton-water interaction.

A separate problem is the stability analysis with the inclusion of unsaturated media, which poses an even higher level of difficulty and requires advanced computational methods to solve [7, 8].

Stability analysis methods

The problem of slope stability is generally widely analyzed in the literature. The first solutions to this problem have been known since the 1950s [9 ÷ 11]. They mainly concerned the assessment of the slope safety depending on its inclination, soil and water conditions and possible additional load on the slope surface. The most general division of analysis methods allows for the separation of three groups of methods. In the first one, the shape of the slope is sought at which the limit state occurs. It is most often described by the elastic-perfectly plastic Coulomb-Mohr model, and the parameters determining the stability are cohesion and the angle of internal friction. **The Sokolowski method** is very popular, for which various nomograms have been created for its practical application [12]. A serious drawback of this group of methods is the inability to take into account soil stratification (usually a weighted average of parameter values is assumed, which is often too imprecise an approximation of the problem and ve-

we i kolejowe) często zabezpieczeniem jest wykonanie nasypu z gruntu zbrojonego geosyntetykami [5, 6]. Należy podkreślić, że wpływ na stateczność ma zarówno typ i sposób wykonania konstrukcji obiektu, jak i stan podłoża gruntowego, na którym obiekt będzie wykonany.

Oddzielnym problemem, który jest bardzo często obserwowany przy powstaniu awarii, związanych z utratą stateczności, jest **oddziaływanie wody**. Bardzo destrukcyjny wpływ na zachowanie równowagi skarpy mają przede wszystkim zjawiska związane z ruchem wody. Jej filtracja powoduje powstanie sił ciśnienia sphywowego stanowiących dodatkowe oddziaływania, które należy najczęściej zaliczyć do sił zsuwających. Ponadto woda filtrująca w gruncie może powodować zjawiska kolmatacji (wypełnianie przestrzeni przez drobne cząstki gruntu) lub sufozji (wymywanie drobnych cząstek), które powodują zmianę właściwości ośrodka gruntowego. Szczególnie niebezpieczna jest sufozja, obserwowana często przy utracie stateczności wałów przeciwpowodziowych. Ponadto ekspozycja powierzchni skarpy na warunki atmosferyczne (szczególnie na ulewne deszcze) ma wpływ na pogorszenie się właściwości mechanicznych gruntów i dlatego często obserwowane są osuwiska występujące po obfitych opadach deszczu.

W literaturze przedstawiono wiele metod analizy stateczności i szacowania wartości współczynnika stateczności, ale często pomija się wpływ ciśnienia sphywowego. Chcąc właściwie uwzględnić ciśnienie sphywowe, należy wykonać analizy z wykorzystaniem elementów skończonych i przyjąć dwuskładnikowy ośrodek gruntowy, co pozwala na symulację interakcji szkielet gruntowy – woda.

Oddzielnym problemem jest analiza stateczności z ujęciem ośrodków nienasyconych, która wymaga zaawansowanych metod obliczeniowych [7, 8].

Metody analizy stateczności

Problem stateczności skarp i zboczy jest szczegółowo analizowany w literaturze. Pierwsze rozwiązania tego problemu są już znane od lat pięćdziesiątych ubiegłego wieku [9 ÷ 11]. Dotyczyły one przede wszystkim oceny bezpieczeństwa skarpy w zależności od jej nachylenia, warunków gruntowo-wodnych oraz ewentualnego dodatkowego obciążenia nazium. Najbardziej ogólny podział metod analizy pozwala na wyodrębnienie trzech grup metod. W pierwszej poszukuje się takiego kształtu zbocza, przy którym występuje stan graniczny. Najczęściej jest on opisywany sprężysto-idealnie plastycznym modelem Coulomba-Mohra, a parametrami decydującymi o stateczności są spójność i kąt tarcia wewnętrzznego. Bardzo popularna jest **metoda Sokolowskiego**. W celu praktycznego jej zastosowania stworzono różnego rodzaju nomogramy [12]. Istotnym mankamentem tej grupy metod jest brak możliwości uwzględnienia uwarstwienia gruntów (zwykle przyjmuje się średnią ważoną wartości parametrów, co jest często zbyt mało dokładne i nie stanowi rozwiązania problemu) oraz wpływu ciśnienia sphywowego wody. Z tych powodów metoda ta jest obecnie bardzo rzadko wykorzystywana, a jej zastosowanie najczęściej sprowadza się do wstępnej oce-

ry often does not provide a solution to the problem) and the influence of water runoff pressure. Therefore, this method is currently very rarely used, and its application is most often reduced to the initial assessment of the stability of a given slope. The second group of methods, which are much more frequently used by engineers, are the **so-called strip** (block) methods. In these methods, the equilibrium of mentally separated soil blocks along the slide surface specified by the user is analyzed [11, 13, 14]. Since the problem posed in this way does not have a unique solution (too few equations in relation to the number of unknowns), depending on the additional assumptions made regarding the interaction between individual blocks, the following methods can be distinguished: **Fellenius, Bishop, Janbu, Morgernstern-Price and many others** [13]. The stability factor F_s is defined as the ratio of generalized forces maintaining the system M_u (usually moments of forces relative to a specific point) to the values of forces causing the soil block to slide M_z , which can be written as [11, 14]:

$$F_s = M_u/M_z \quad (1)$$

The impacts causing the formation of a landslide are primarily the self-weight of the soil, the water runoff pressure and additional loads resulting from, for example, exploitation. The holding forces are the result of the soil's shear strength along the assumed slide surface. The strength of soil medium is usually described by the Coulomb relationship, and the model parameters are cohesion c and the angle of internal friction ϕ . Block methods are very often used in practical problems. Their weak point is the need to initially define the slide surface, which in advanced analyses should be the result of the performed calculations. In block methods, it is possible to take into account the inhomogeneity of the soil medium and the water runoff pressure, which cannot be done in methods based on the analysis of the stress state in the subsoil. Block methods are usually not used for the analysis of three-dimensional problems, although the latter are performed extremely rarely in the engineering practice.

In the literature, it can also find a simple estimation of the stability coefficient based on the slope inclination and mechanical properties of the soils forming the slope. A frequently used formula is [12]:

$$F_s = \frac{\tan \varphi' + \frac{2c'}{\gamma z \sin 2\beta} - \frac{\sigma^s}{\gamma z} (\tan \beta + \cot \beta) \tan \varphi'}{\tan \beta} \quad (2)$$

where:

- φ' – effective value of the internal friction angle [°];
- c' – effective cohesion [kPa];
- σ^s – average stresses [kPa];
- γ – soil weight [kN/m³];
- z – slope height [m];
- β – slope inclination angle [°].

The above relationship concerns the loss of stability consisting in the sliding of the top soil layer along the slope surface (shallow slide), a mechanism that very often occurs in mountainous areas on relatively gentle slopes. It is caused by sudden hydration of the ground surface due to heavy rains and improper drainage of rainwater.

ny stateczności danego zbrocza. Druga grupa metod, które są znacznie częściej stosowane przez inżynierów, to tzw. **metody paskowe** (blokowe), w których analizuje się równowagę wydzielonych myślowo bloków gruntowych wzdłuż zadanej przez użytkownika powierzchni poślizgu [11, 13, 14]. Tak postawione zagadnienie nie ma jednak jednoznacznego rozwiązania (zbyt mała liczba równań w stosunku do liczby niewiadomych). W zależności od przyjętych dodatkowych założeń, dotyczących współpracy pomiędzy poszczególnymi blokami, można wyróżnić metody: **Felleniusa, Bishopa, Janbu, Morgernsterna-Price'a i wiele innych** [13]. Współczynnik stateczności F_s definiuje się jako stosunek uogólnionych sił utrzymujących układ M_u (zwykle momentów sił względem określonego punktu) do wartości sił powodujących zsuw bryły gruntu M_z , co można zapisać wzorem [11, 14]:

$$F_s = M_u/M_z \quad (1)$$

Oddziaływaniami powodującymi powstanie osuwiska są przede wszystkim ciężar własny gruntów, ciśnienie spływo-we wody oraz dodatkowe obciążenia wynikające np. z eksploatacji. Siły utrzymujące są wynikiem wytrzymałości gruntu na ścinanie wzdłuż założonej powierzchni poślizgu. Wytrzymałość ta jest zwykle opisywana zależnością Coulomba, a parametrami modelu są spójność c oraz kąt tarcia wewnętrznego ϕ . Metody paskowe są bardzo często wykorzystywane w praktyce. Ich słabą stroną jest konieczność wstępnego definiowania powierzchni poślizgu, która w zaawansowanych analizach powinna być wynikiem prowadzonych obliczeń. W metodach blokowych możliwe jest uwzględnienie niejednorodności ośrodka gruntowego oraz ciśnienia spływo-wego wody, czego nie można zrobić w metodach bazujących na analizie stanu naprężenia w podłożu. Metod paskowych zwykle nie stosuje się do analizy zagadnień trójwymiarowych, ale te w praktyce inżynierskiej są wykonywane niezmiernie rzadko.

W literaturze można również odnaleźć proste oszacowanie współczynnika stateczności na podstawie nachylenia zbrocza oraz właściwości mechanicznych gruntów tworzących skarpe. Często wykorzystywany wzór ma postać [12]:

$$F_s = \frac{\tan \varphi' + \frac{2c'}{\gamma z \sin 2\beta} - \frac{\sigma^s}{\gamma z} (\tan \beta + \cot \beta) \tan \varphi'}{\tan \beta} \quad (2)$$

gdzie:

- φ' – efektywna wartość kąta tarcia wewnętrznego [°];
- c' – spójność efektywna [kPa];
- σ^s – naprężenia średnie [kPa];
- γ – ciężar gruntu [kN/m³];
- z – wysokość skarpy [m];
- β – kąt nachylenia zbrocza lub skarpy [°].

Zależność (2) dotyczy utraty stateczności polegającej na zsunieniu się wierzchniej warstwy gruntu wzdłuż powierzchni zbrocza (płytki zsuw). Mechanizm ten bardzo często występuje w terenach górskich na relatywnie łagodnych zbrozczach i jest spowodowany nagłym nawodnieniem powierzchni gruntu wskutek ulewnych deszczy i niewłaściwego odprowadzenia wód opadowych.

The last group of methods, which are currently very much developed and increasingly used, are **numerical methods** [15, 16]. The most popular among them is the $c - \tan \phi$ shear strength reduction method, in short $c - \phi$ reduction [17 ÷ 19]. The use of this calculation method requires a numerical solution of the problem of soil deformation, within which the state of stress and strain in the soil medium at a given stage of analysis will be determined. For this purpose, the finite element method [20, 21] or the finite difference method [15] are most often used. Depending on the problem under consideration, various factors are taken into account that affect the value of the safety factor, such as the heterogeneity of the soil medium, the load on the backfill or the surface of the slope, protection or structures embedded in the ground, pore water pressure and other important factors [22 ÷ 24]. In the most advanced analyses, coupled problems are solved, an example of which is the consolidation phenomenon, which is a coupling of the fields of ground water filtration and the deformation of the soil medium [25]. Numerical methods also enable the analysis of three-dimensional problems [26 ÷ 29].

In engineering issues, the influence of mass movements (and the resulting loss of slope stability) on construction objects is very often analyzed in the broadest sense. The stability of communication embankments and excavations is considered [30], as well as its influence on other infrastructure elements, e.g. networks [31, 32]. The literature also includes analyses of the influence of landslides on construction objects located on slopes [33, 34], as well as analyses of factors causing the landslide initiation process [35].

The calculation method used for the stability analyses presented later in the article is the $c - \phi$ **strength reduction procedure**. The adopted analysis method assumes a gradual decrease (in individual calculation steps) of the strength parameter values of the material model (an elastic-perfectly plastic model with a Coulomb-Mohr surface was assumed), according to the relationship:

$$\begin{aligned} F_{n+1} &= F_n + \Delta F \\ c_{n+1} &= c_0 / F_{n+1} \\ \phi_{n+1} &= \phi_0 / F_{n+1} \end{aligned} \quad (3)$$

where:

c_0, ϕ_0 – values of parameters of the model at the beginning of the analysis (input values),

ΔF – assumed incremental step in the stability analysis.

Reducing the cohesion value and the internal friction angle causes the volume limited by the yield surface in the stress space to decrease, which means that some points will be outside the area limited by this surface. Since such a state is physically inadmissible, it is necessary to use an iterative procedure that will allow these points to be entered to the yield surface. For this purpose, traditional methods of integrating constitutive equations used in numerical analyses, e.g. Newton-Raphson, BFGS, Initial stiffness, and others [36] are used. Within the iteration, plastic (permanent) strains are generated, and a change in the stress state at a given point causes stress redistribution. The above procedure is carried

Outlast group of methods, which are currently very much developed and increasingly used, are **numerical methods** [15, 16]. The most popular among them is the $c - \tan \phi$ shear strength reduction method, in short $c - \phi$ reduction [17 ÷ 19]. The use of this calculation method requires a numerical solution of the problem of soil deformation, within which the state of stress and strain in the soil medium at a given stage of analysis will be determined. For this purpose, the finite element method [20, 21] or the finite difference method [15] are most often used. Depending on the problem under consideration, various factors are taken into account that affect the value of the safety factor, such as the heterogeneity of the soil medium, the load on the backfill or the surface of the slope, protection or structures embedded in the ground, pore water pressure and other important factors [22 ÷ 24]. In the most advanced analyses, coupled problems are solved, an example of which is the consolidation phenomenon, which is a coupling of the fields of ground water filtration and the deformation of the soil medium [25]. Numerical methods also enable the analysis of three-dimensional problems [26 ÷ 29].

In engineering issues, the influence of mass movements (and the resulting loss of slope stability) on construction objects is very often analyzed in the broadest sense. The stability of communication embankments and excavations is considered [30], as well as its influence on other infrastructure elements, e.g. networks [31, 32]. The literature also includes analyses of the influence of landslides on construction objects located on slopes [33, 34], as well as analyses of factors causing the landslide initiation process [35].

The calculation method used for the stability analyses presented later in the article is the $c - \phi$ **strength reduction procedure**. The adopted analysis method assumes a gradual decrease (in individual calculation steps) of the strength parameter values of the material model (an elastic-perfectly plastic model with a Coulomb-Mohr surface was assumed), according to the relationship:

$$\begin{aligned} F_{n+1} &= F_n + \Delta F \\ c_{n+1} &= c_0 / F_{n+1} \\ \phi_{n+1} &= \phi_0 / F_{n+1} \end{aligned} \quad (3)$$

gdzie:

c_0, ϕ_0 – wartości parametrów modelu na początku analizy (wartości wejściowe);

ΔF – założony krok przyrostowy w analizie stateczności.

Zmniejszenie wartości spójności i kąta tarcia wewnętrzznego powoduje, że zmniejsza się objętość ograniczona przez powierzchnię plastyczności w przestrzeni naprężeń. Z tego powodu część punktów znajdować się będzie poza obszarem zajmowanym przez tę powierzchnię. W związku z tym, że taki stan jest fizycznie niedopuszczalny, zachodzi konieczność zastosowania procedury iteracyjnej, która umożliwi sprowadzenie tych punktów na powierzchnię plastyczności. W tym celu wykorzystywane są tradycyjne metody całkowania równań konstytutywnych stosowane w analizach numerycznych, np. Newtona-Raphsona, BFGS, Initial stiffness i inne [36]. W ramach iteracji generowane są odkształcenia niesprężyste (trwałe), a zmiana stanu naprężenia w danym punkcie powoduje redystrybucję

out until the iterative process fails to converge. The searched value of the safety factor, in such a case F_s , is equal to the value F_n at the moment when further calculations can no longer be continued due to the lack of convergence.

The state of unstable equilibrium occurs at the value of the coefficient $F_s = 1.0$. Higher values indicate a certain safety margin from the point of view of slope stability. The above method makes it impossible to obtain values lower than 1.0 due to the lack of convergence of calculations at the beginning of numerical analyses. In such a case, it can be stated at most that $F_s < 1$, and the exact value of the safety factor remains unknown. Although the so-called strip methods allow for estimating the value of F_s in such cases, due to the instability of such slopes, the exact value in such a case is of little importance in practice.

In addition to the safety factor defined above, the result of analyses carried out using the $c - \phi$ reduction method is also the state of model displacements accompanying the lack of convergence of iterations. Based on the analysis of the displacement map, a slide surface can be distinguished, which illustrates the mechanism of destruction, with the corresponding value of the safety factor. Since the shape of the slide surface is the result of numerical analyses and not the result of specific assumptions, as is the case in block methods, the stability analysis using the $c - \phi$ reduction method is more reliable in assessing the condition of a slope and in assessing the safety margin due to the risk of landslide formation. Moreover, the $c - \phi$ reduction method can also be successfully used in the problems of estimating the bearing capacity of the subsoil in the case of complex loading [37]. A certain problem is the fact that the obtained result may depend on the effectiveness of the iterative procedure, however, in the case of convergence problems, the value of the F_s coefficient is on the safe side.

The $c - \phi$ strength reduction method can also be used for other elastic-plastic material models, in which strength properties are described by parameters other than cohesion and internal friction angle. Then the procedure described above can be modified in such a way that the values of other strength parameters are proportionally reduced, and the value of the safety factor is calculated based on their current value after achieving non-convergence of calculations [36]. A disadvantage of the described stability analysis method is the fact that the obtained result depends on the effectiveness of the iterative procedures used. On the other hand, available programs enabling FEM analyses usually have several iteration methods implemented, thanks to which it is possible to use one that will give the best (most reliable) results, which can be assessed on the basis of the obtained destruction mechanisms and the analysis of the development of plastic zones in the model.

Model of the soil medium

The most commonly used in geotechnical problems is the **elastic-perfectly plastic Coulomb-Mohr model**. In the elastic phase (before a point in the stress space reaches the

naprężeń. Procedura ta wprowadzona jest aż do momentu wystąpienia braku zbieżności procesu iteracyjnego. Poszukiwana wartość współczynnika stateczności, w takim przypadku F_s , jest równa wartości F_n w momencie, gdy dalsze obliczenia nie mogą być już kontynuowane ze względu na brak zbieżności.

Stan chwiejnej równowagi występuje przy wartości współczynnika $F_s = 1,0$. Wartości większe oznaczają pewien zapas bezpieczeństwa z punktu widzenia stateczności skarpy. Omawiana metoda uniemożliwia uzyskanie wartości mniejszych od 1,0 ze względu na brak uzyskania zbieżności obliczeń w momencie rozpoczęcia analiz numerycznych. W takim przypadku można co najwyżej stwierdzić, że $F_s < 1$, a dokładna wartość współczynnika stateczności pozostaje nieznaną. Wprawdzie tzw. metody paskowe pozwalają na oszacowanie wartości F_s w takich przypadkach, ale ze względu na niestateczność takich skarp, dokładna wartość nie ma większego znaczenia w praktyce.

Oprócz zdefiniowanego współczynnika stateczności, wynikiem analiz przeprowadzonych metodą redukcji $c - \phi$ jest również stan przemieszczeń modelu towarzyszący brakowi zbieżności iteracji. Na podstawie analizy mapy przemieszczeń można wyodrębnić powierzchnię poślizgu, która obrazuje mechanizm zniszczenia, przy odpowiadającej wartości współczynnika stateczności. W związku z tym, że kształt powierzchni poślizgu jest wynikiem analiz numerycznych, a nie wynikiem konkretnych założeń, jak ma to miejsce w metodach paskowych, analiza stateczności metodą redukcji $c - \phi$ jest bardziej wiarygodna w ocenie stanu zbocza lub skarpy oraz przy ocenie zapasu bezpieczeństwa ze względu na ryzyko powstania osuwiska. Ponadto metoda redukcji $c - \phi$ może być z powodzeniem stosowana w szacowaniu nośności podłoża w przypadku działania złożonego obciążenia [37]. Pewnym problemem jest fakt, że uzyskany wynik może zależeć od skuteczności procedury iteracyjnej, ale w przypadku problemów ze zbieżnością wartość współczynnika F_s znajduje się po stronie bezpiecznej.

Metodę redukcji wytrzymałości $c - \phi$ można również wykorzystać przy innych sprężysto-plastycznych modelach materiałowych, w których właściwości wytrzymałościowe opisują inne parametry niż spójność i kąt tarcia wewnętrznego. Opisaną procedurę można wówczas zmodyfikować w taki sposób, że proporcjonalnie zmniejszane są wartości innych parametrów wytrzymałościowych, a wartość współczynnika stateczności obliczana jest na podstawie ich bieżącej wartości po osiągnięciu braku zbieżności obliczeń [36]. Wadą opisywanej metody analizy stateczności jest fakt, że uzyskany wynik zależy od skuteczności zastosowanych procedur iteracyjnych. Z drugiej jednak strony, dostępne programy umożliwiające wykonanie analiz MES, mają zwykle zaimplementowane kilka metod iteracji, dzięki czemu można zastosować taką, która da najlepsze (najbardziej wiarygodne) rezultaty, co można ocenić na podstawie uzyskanych mechanizmów zniszczenia oraz analizy rozwoju stref plastycznych w modelu.

Model ośrodka gruntowego

Najczęściej w zagadnieniach geotechnicznych wykorzystywany jest **sprężysto-idealnie plastyczny model Coulomba-Mohra**. W fazie sprężystej (zanim punkt w przestrzeni

yield surface), the soil behavior is described by an isotropic linear-elastic model, and the deformation parameters are the deformation modulus (elasticity modulus) E and Poisson's ratio ν . The parameters of the adopted model that describe the yield surface are the angle of internal friction ϕ' and cohesion c' , and the equation of this surface is given by the formula [12, 38]:

$$f(p',q,\theta) = p' \sin \phi' - 1/3q(\sqrt{3}\cos \theta + \sin \theta \cdot \sin \phi') + c' \cdot \cos \phi = 0 \quad (4)$$

where

- p' – average stress (effective) [kPa];
- q – deviatoric stress (stress intensity) [kPa];
- θ – Lode's angle [°].

The above quantities are invariants of the stress tensor, which define the position of a given point in stress space in relation to the current yield surface (Fig. 1). In the elastic state, a given point is located inside this surface, while after reaching the plastic state, only movement on this surface is possible. Movement of a point inside the surface requires unloading, but it is not possible to go beyond the yield surface.

In order to properly model the effect of the water filtration in the ground on the stress and strain state in the soil medium, including the action of runoff pressure, it is not enough to assume the soil medium as a single-component medium. It is necessary to take into account the individual phases of the medium. The simplest description is the analysis of a fully saturated medium, in which there is a soil skeleton and the pores are completely filled with water. A more complex example is the analysis of unsaturated soils, in which the suction pressure due to the presence of air in part of the pore volume is additionally taken into account [3, 29]. However, in the latter case it is usually very difficult to select the values of the model parameters for analysis, and in addition, such models are not available in the most commonly used finite element analysis programs.

A fully saturated soil is a two-component medium in which stresses are taken by the soil skeleton and by water. In the case of the skeleton, a full stress tensor σ' is defined, the components of which are both normal and tangential stresses. These stresses are called the effective stresses. Whereas, water completely filling the pores of the soil transfers normal stresses u , the value of which is the same in all directions, based on Pascal's law. These stresses are called pore water pressure. For obvious reasons, water cannot transfer tangential stresses. External interactions act on the soil medium as a whole. The relationship between effective stresses (taken by the soil skeleton) and pore water pressure is defined by Terzaghi's law, presented in vector form, which is usually used in numerical solutions:

naprężeń osiągnie powierzchnię plastyczności), zachowanie się gruntu opisuje model izotropowy liniowo-sprężysty, a parametrami deformacyjnymi są moduł odkształcenia (sprężystości) E oraz współczynnik Poissona ν . Parametrami przyjętego modelu, które opisują powierzchnię plastyczności, są kąt tarcia wewnętrznego ϕ' oraz spójność c' , a równanie tej powierzchni opisane jest wzorem [12, 28]:

$$f(p',q,\theta) = p' \sin \phi' - 1/3q(\sqrt{3}\cos \theta + \sin \theta \cdot \sin \phi') + c' \cdot \cos \phi = 0 \quad (4)$$

gdzie:

- p' – naprężenie średnie (efektywne) [kPa];
- q – naprężenie dewiatorowe (intensywność naprężenia) [kPa];
- θ – kąt Lodego [°].

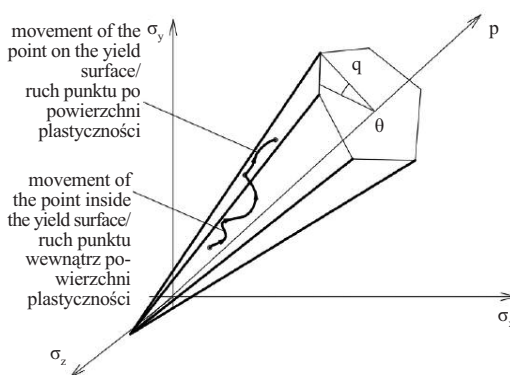


Fig. 1. Stress path of a material point in the stress space
Rys. 1. Ścieżka naprężenia punktu materialnego w przestrzeni naprężeń

Opisane wielkości ze wzoru (4) są niezmiennikami tensora naprężenia, określającymi położenie danego punktu w przestrzeni naprężeń w stosunku do aktualnej powierzchni plastyczności (rysunek 1). W stanie sprężystym dany punkt znajduje się wewnątrz tej powierzchni, natomiast po osiągnięciu stanu plastyczności możliwy jest jedynie ruch po tej powierzchni. Ruch punktu do wewnątrz powierzchni wymaga wywołania odciążenia, natomiast nie jest możliwe wyjście poza powierzchnię plastyczności.

W celu właściwego modelowania wpływu filtracji wody w gruncie na stan naprężenia i odkształcenia w ośrodku gruntowym, w tym działanie ciśnienia sphywowego, niewystarczające jest przyjęcie ośrodka gruntowego jako jednoskładnikowego, a należy też uwzględnić poszczególne fazy ośrodka. Najprostszym opisem jest analiza ośrodka w pełni nasyconego, w którym występuje szkielet gruntowy, a pory są w całości wypełnione wodą. Przykładem bardziej złożonym jest analiza gruntów nienasyconych, w których dodatkowo uwzględnia się ciśnienie ssania występujące z powodu obecności powietrza w części objętości porów [3, 29]. W tym ostatnim przypadku zwykle bardzo trudno jest jednak dobrać do analiz wartości parametrów modelu, a ponadto tego typu modele nie są dostępne w najczęściej stosowanych programach do analizy metodą elementów skończonych.

Grunt w pełni nasycony jest ośrodkiem dwuskładnikowym, w którym naprężenia przenoszone są przez szkielet gruntowy oraz przez wodę. W przypadku szkieletu definiuje się pełny tensor naprężenia σ' , którego składowymi są zarówno naprężenia normalne, jak i styczne. Naprężenia te są nazywane efektywnymi. Natomiast woda całkowicie wypełniająca pory gruntu przenosi naprężenia normalne u , których wartości we wszystkich kierunkach, na podstawie prawa Pascala, jest taka sama. Naprężenia te są nazywane ciśnieniem wody w porach. Z oczywistych względów, woda nie może przenosić naprężeń stycznych. Oddziaływania zewnętrzne działają na ośrodek gruntowy jako całość. Zależność pomiędzy naprężeniami efektywnymi (przenoszonymi przez szkielet gruntowy) a ciśnieniem wody w porach określa prawo Terzaghiego, przedstawione w postaci wektorowej, która jest zwykle stosowana w rozwiązaniach numerycznych:

$$\sigma = \sigma' + m \cdot u \quad (5)$$

where:

$\sigma = \{\sigma_x \sigma_y \sigma_z \tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx}\}^T$ – vector of the total stress;
 $\sigma' = \{\sigma'_x \sigma'_y \sigma'_z \tau'_{xy} \tau'_{yz} \tau'_{zx}\}^T$ – vector of the effective stress;
 $m = \{1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0\}^T$ – unit vector.

It should be noted that the pore water pressures take the highest value when an external impact is triggered (the so-called undrained condition), and over time, due to the consolidation process, these pressures decrease to the value occurring in the steady state, which results from the assumed boundary conditions for the filtration phenomenon.

Since the model analyses the behaviour of the soil skeleton, the effective values of individual soil layers should be used for calculations. This applies in particular to the cohesion c' and the of internal friction angle ϕ' . It should be noted that the old but very popular Polish standard PN-81/B-03020 provides so-called „total values” that characterise the soil medium as a single whole (single-component medium), without distinguishing between the soil skeleton and pores filled with water.

Water runoff pressure

The runoff pressure is the effect of water flowing in the ground and is created by the resistance to this movement. In general, the value of the runoff pressure is [1]:

$$p_s = i \cdot \gamma_w \quad (6)$$

where:

p_s – runoff pressure [kN/m²];
 i – hydraulic gradient [-];
 γ_w – volumetric weight of water [kN/m³].

Water runoff pressure is a mass (volume) force that affects on the state of stress and deformation in the soil medium. Multiplying the value of runoff pressure by the volume of the element (performed by the operation of integration) gives a force in the direction tangential to the water flow line. In the case of earthworks, runoff pressure can be the cause of hydraulic breakdown or other failure related to water filtration in the ground. However, in the case of slopes or escarpments, due to the shape of the water depression surface (higher water level at the top of the slope, lower at the bottom), the direction and turn of the runoff pressure action causes a sliding force of the earth mass, which generally has a very significant effect on the stability of the slopes. Although in more permeable soils (with higher values of the Darcy coefficient k) the filtration rates are significantly higher, in cohesive soils, due to the greater hydraulic drops, the values of runoff pressure forces can be higher. Of course, the pressure forces in the case of cohesive soils usually have a more vertical direction, which can sometimes have a beneficial effect on the safety factor. In any case, this aspect should be taken into account, especially in the case of natural slopes that may be exposed to heavy rain.

The numerical FEM model, which is able to include the action of the downdraft pressure, must take into account at least the soil skeleton and pore water (two-component

$$\sigma = \sigma' + m \cdot u \quad (5)$$

gdzie:

$\sigma = \{\sigma_x \sigma_y \sigma_z \tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx}\}^T$ – wektor naprężenia całkowitego;
 $\sigma' = \{\sigma'_x \sigma'_y \sigma'_z \tau'_{xy} \tau'_{yz} \tau'_{zx}\}^T$ – wektor naprężenia efektywnego;
 $m = \{1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0\}^T$ – wektor jednostkowy.

Należy podkreślić, że ciśnienie wody w porach przyjmuje największą wartość w momencie wywołania oddziaływania zewnętrznego (stan „bez odpływu”), a w miarę upływu czasu, ze względu na proces konsolidacji, ciśnienie to zmniejsza się do wartości występujących w stanie ustalonym, który wynika z założonych warunków brzegowych w przypadku zjawiska filtracji.

W związku z tym, że w modelu analizowane jest zachowanie się szkieletu gruntowego, do obliczeń należy przyjąć wartości efektywne poszczególnych warstw gruntowych. Dotyczy to przede wszystkim spójności c' i kąta tarcia wewnętrznego ϕ' . Należy zwrócić uwagę na fakt, że w bardzo chętnie wykorzystywanej starej normie PN-81/B-03020 podano tzw. wartości całkowite, które charakteryzują ośrodek gruntowy jako jedną całość (ośrodek jednoskładnikowy), bez podziału na szkielet gruntowy i pory wypełnione wodą.

Ciśnienie sphywowe

Ciśnienie sphywowe to oddziaływanie będące skutkiem przepływającej wody w gruncie i powstaje w wyniku oporów tego ruchu. Wartość ciśnienia sphywowego wynosi [1]:

$$p_s = i \cdot \gamma_w \quad (6)$$

gdzie:

p_s – ciśnienie sphywowe [kN/m²];
 i – spadek hydrauliczny [-];
 γ_w – ciężar objętościowy wody [kN/m³].

Ciśnienie sphywowe wody jest siłą masową, która ma wpływ na stan naprężenia i odkształcenia w ośrodku gruntowym. Iloczyn wartości ciśnienia sphywowego i objętości elementu (wykonane przez operację całkowania) daje siłę o kierunku stycznym do linii przepływu wody. W przypadku wykonywania robót ziemnych ciśnienie sphywowe może być powodem przebiccia hydraulicznego lub innej awarii związanej z filtracją wody w gruncie. Natomiast w przypadku skarpy i zboczy, ze względu na ukształtowanie powierzchni depresji wody (wyższy poziom wody na górze zbocza, niższy na dole), kierunek i zwrot działania ciśnienia sphywowego powoduje powstanie siły zsuwającej masy ziemnej, co ma bardzo istotny wpływ na stateczność zbocza lub skarpy. W gruntach bardziej przepuszczalnych (o dużych wartościach współczynnika Darcy k), prędkość filtracji jest wprawdzie bardzo duża, ale w gruntach spoistych, ze względu na duże spadki hydrauliczne, wartości sił ciśnienia sphywowego mogą być jeszcze większe. Siły ciśnienia sphywowego w przypadku spoistych gruntów zwykle mają kierunek bardziej pionowy, co niekiedy może mieć korzystny wpływ na wartość współczynnika stateczności. Ten aspekt powinien być brany pod uwagę przede wszystkim w przypadku zboczy naturalnych narażonych na działanie ulewnych deszczy.

Model numeryczny MES, który jest w stanie ująć działanie ciśnienia sphywowego, musi uwzględniać przynajmniej szkielet gruntowy i wodę w porach (ośrodek dwuskładnikowy

medium). After defining the geometric shape of the slope together with the subsoil, the analyzed area should be divided into finite elements (Fig. 2). In the case of a plane strain state, four-node quadrangular finite elements are used. In each node, a total of 3 degrees of freedom are defined: 2 independent displacements (in the horizontal and vertical direction) to solve the problem of deformation of the subsoil and the pore water pressure, the distribution of which will be the solution to the filtration problem. Next, the boundary conditions should be defined – separately for the filtration problem, separately for the deformation of the soil medium. In the case of filtration, the piezometric level of water was defined at the upper and lower edge of the slope, and additionally, the free flow of water through the side edges of the model and the impossibility of flow through the lower edge were assumed. Due to the possibility of water flowing out from the inside of the slope to the surface, variable boundary conditions were applied on this edge. They allow for the free flow of water, if such a situation occurs, but otherwise they constitute the edge of the model preventing the free flow of water. The setting of this type of variable boundary conditions is possible using the „seepage” elements in the program Z_Soil ver. 2020 [39]. For the problem of soil deformation, standard geotechnical boundary conditions are usually applied, consisting in blocking the possibility of displacements in both directions in the nodes on the lower edge of the model and blocking the possibility of displacement in the horizontal direction on the side edges.

The first stage of the numerical analyses was the generation of the state of primary stresses in the slope and subsoil. The slope inclination was assumed to be approximately 1 : 2.0, which corresponds to an angle of 26.6°. This inclination corresponds to fairly steep natural slopes, while in the case of slopes that are part of buildings or communication structures, it is a slightly gentler slope than the commonly used 1 : 1.5. When generating the primary state of stress, the current geometric shape was assumed – the courses of processes (both geological and construction works) leading to the creation of a given slope or subsoil were not simulated. At the same time, in this stage, the problem of filtration established with the above-described boundary conditions for water flow in the ground was solved. The solution to the filtration problem is a **map of pore pressures**. The isoline „0” indicates the water level in the slope and subsoil. A correctly generated pore water pressure distribution, when it is not hydrostatic (e.g. in the case of models taking into account slopes), causes the formation of runoff pressure forces, which are the subject of the analyses of this article. Runoff pressure forces are included in the balance of all forces in the constructed model. This stage was followed by the main part of the stability analyses, in which the value of the safety factor F_s described earlier was estimated using the $c - \phi$ reduction method. It was assumed that the value of this factor corresponds to the current value of F_n at the time of obtaining the lack of convergence of the numerical integration procedures, while the course of the slide surface was assessed based on the

wy). Po zdefiniowaniu kształtu geometrycznego skarpy (zbocza) wraz z podłożem gruntowym, analizowany obszar należy podzielić na elementy skończone (rysunek 2). W przypadku płaskiego stanu odkształcenia wykorzystuje się czterowęzłowe czworokątne elementy skończone. W każdym węźle definiuje się łącznie 3 stopnie swobody: 2 niezależne przemieszczenia (w kierunku poziomym i pionowym) w celu rozwiązania problemu deformacji ośrodka oraz ciśnienie wody w porach, którego rozkład w obszarze będzie rozwiązaniem problemu filtracji. W dalszej kolejności należy zdefiniować warunki brzegowe – osobno w przypadku filtracji i deformacji ośrodka gruntowego. W przypadku filtracji zdefiniowano poziom piezometryczny wody przy górnej i dolnej krawędzi zbocza, a dodatkowo założono swobodny przepływ wody przez boczne krawędzie modelu oraz brak możliwości przepływu przez dolną krawędź. Ze względu na możliwość wypływu wody z wnętrza skarpy na powierzchnię zastosowano zmienne warunki brzegowe. Umożliwiają one swobodny wypływ wody w przypadku, gdy do takiej sytuacji dochodzi, natomiast w przeciwnym wypadku stanowią brzeg modelu uniemożliwiający swobodny przepływ wody. Zadanie tego typu zmiennych warunków brzegowych umożliwiają elementy „seepage” w wykorzystanym programie Z_Soil ver. 2020 [39]. W przypadku deformacji ośrodka gruntowego zwykle stosuje się standardowe geotechniczne warunki brzegowe polegające na zablokowaniu możliwości przemieszczeń w obu kierunkach w węzłach na dolnej krawędzi modelu oraz zablokowaniu możliwości przemieszczenia w kierunku poziomym na bocznych krawędziach.

Pierwszym etapem wykonanych analiz numerycznych była generacja stanu naprężeń pierwotnych w skarpie i podłożu gruntowym. Założono nachylenie skarpy wynoszące ok. 1 : 2,0, co odpowiada kątowi 26,6°. Oznacza to dosyć strome zbocze naturalne, natomiast w przypadku skarpy stanowiących część obiektów budowlanych lub komunikacyjnych jest to nieco łagodniejsze nachylenie niż powszechnie stosowane 1 : 1,5. Generując stan pierwotny naprężeń, założono występowanie aktualnego kształtu geometrycznego. Nie symulowano przebiegu procesów (zarówno geologicznych, jak i robót budowlanych), prowadzących do powstania danego zbocza lub skarpy. Na tym etapie rozwiązano jednocześnie zagadnienie filtracji ustalonej przy opisanych wcześniej warunkach brzegowych na przepływ wody w gruncie. Rozwiązaniem zagadnienia filtracji jest **mapa ciśnień porowych**. Izolinia „0” oznacza poziom wody w skarpie i podłożu gruntowym. Prawdłowo wygenerowany rozkład ciśnienia wody w porach, w przypadku gdy nie jest hydrostatyczny (np. w przypadku modeli uwzględniających skarpy), powoduje powstanie sił ciśnienia spływowego, które jest przedmiotem analiz artykułu. Siły ciśnienia spływowego uwzględniono w bilansie wszystkich sił w zbudowanym modelu. Po tym etapie następowała zasadnicza część analiz stateczności, w ramach której szacowano wartość współczynnika stateczności F_s opisaną wcześniej metodą redukcji $c - \phi$. Założono, że wartość tego współczynnika odpowiada aktualnej wartości F_n w momencie uzyskania braku zbieżności procedur całkowania numerycznego, natomiast przebieg powierzchni poślizgu

analysis of the map of total displacements of the model generated in the last calculation step, in which the lack of convergence occurred.

Results of numerical analyses

The most important result of the stability analyses performed is the value of the safety factor F_s , which is a measure of the safety margin of a given slope due to the risk of triggering a landslide or other movements of earth masses. The second important result is the shape of the slide surface determined on the basis of the displacement map. Here, it is necessary to indicate the clear superiority of the $c - \phi$ reduction method in relation to the block methods, because here the course of the surface is the result of numerical analyses and not an arbitrary assumption made by the user. In addition, it is possible to obtain surfaces of a very irregular shape, as well as more complex mechanisms of loss of stability, which in principle cannot be correctly assumed before starting the calculations.

As an example illustrating the theoretical considerations presented, a 15 m high slope with an inclination of 1 : 2.0 was analyzed. The model of the analyzed problem, along with the division into finite elements, is presented in Fig. 2. It was assumed that the slope subgrade would be homogeneous and the soils forming this subgrade would be characterized by the following values of the model parameters: $\phi' = 35^\circ$, $c' = 5$ kPa, $E = 60$ MPa, $\nu = 0.25$, $k = 1.0$ m/d, $\rho = 1.9$ g/cm³, $\rho_d = 1.6$ g/cm³. The above parameter values correspond to clayey medium sands in a medium-compacted state.

The defined model analyzed the influence of the height of the piezometric groundwater level in the slope surcharge in relation to the water level at the base of the slope on the stability. The next analyzed factor was the impact of rainfall, which was simulated by defining the water filtration flow through the slope surface. The analysis of the impact of the soil parameters on the slope stability was presented in [40].

The solution to the problem of water filtration in the slope is shown in Fig. 3, where a map of pore water pressures is visible for the given boundary conditions. In the analyzed problem, the occurrence of steady filtration conditions was assumed, which usually occurs after some time from the end of heavy rains. Although in general the problem is highly variable, due to the fact that the loss of slope stability

oceniano na podstawie analizy mapy przemieszczeń całkowitych modelu, wygenerowanej w ostatnim kroku obliczeniowym, w którym wystąpił brak zbieżności.

Wyniki analiz numerycznych

Najważniejszym wynikiem wykonanych analiz stateczności jest wartość współczynnika stateczności F_s , który jest miarą zapasu bezpieczeństwa danego zbocza lub skarpy ze względu na ryzyko wywołania osuwiska lub innych ruchów mas ziemnych. Drugim istotnym rezultatem jest kształt powierzchni poślizgu określany na podstawie mapy przemieszczeń. Należy wskazać wyraźną wyższość metody redukcji $c - \phi$ nad metodami paskowymi, gdyż przebieg powierzchni jest wynikiem analiz numerycznych, a nie arbitralnym założeniem przyjętym przez użytkownika. Ponadto możliwe jest uzyskanie powierzchni o bardzo nieregularnym kształcie, a także bardziej złożonych mechanizmów utraty stateczności, których w zasadzie nie da się poprawnie założyć przed rozpoczęciem obliczeń.

Jako przykład ilustrujący przedstawione rozważania teoretycznie, analizowano skarpe o wysokości 15 m i nachyleniu 1 : 2,0. Model analizowanego zagadnienia wraz z podziałem na elementy skończone przedstawiono na rysunku 2. Założono, że podłoże skarpy będzie jednorodne, a grunty tworzące to podłoże będą się charakteryzować następującymi wartościami parametrów modelu: $\phi' = 35^\circ$, $c' = 5$ kPa, $E = 60$ MPa, $\nu = 0,25$, $k = 1,0$ m/d, $\rho = 1,9$ g/cm³, $\rho_d = 1,6$ g/cm³. Wymienione wartości parametrów odpowiadają zaglinionym piaskom średnim w stanie średnio zagęszczonym.

W zbudowanym modelu analizowano wpływ na stateczność wysokości piezometrycznego poziomu wody gruntowej w naziemiu skarpy w stosunku do poziomu wody u podstawy skarpy. Kolejnym analizowanym czynnikiem był wpływ opadów deszczu, który symulowano przez zdefiniowanie strumienia filtracji wody przez powierzchnię skarpy.

Analizę wpływu wartości parametrów gruntów budujących podłoże na stateczność skarpy przedstawiono w publikacji [40].

Rozwiązanie zagadnienia filtracji wody w skarpie przedstawiono na rysunku 3, na którym widoczna jest mapa ciśnienia wody w porach w przypadku zadanych warunków brzegowych. W analizowanym zagadnieniu założono występowanie ustalonych warunków filtracji, co zwykle zachodzi po pewnym czasie od zakończenia ulewnych deszczy. Pomimo iż zagadnienie jest mocno zmienne, to ze względu na fakt, że utrata

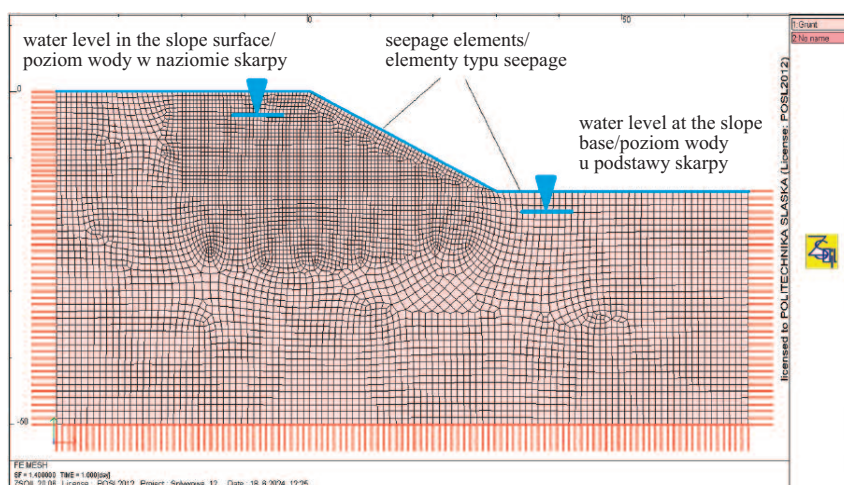


Fig. 2. Numerical model of the analyzed slope
Rys. 2. Model numeryczny analizowanej skarpy

occurs after a longer time from the moment of the occurrence of rains, such an assumption can be considered as correct. The zero pressure line indicates the water level in the slope. When this line intersects the surface of the slope, water flows out of the slope, which in practice means a very high risk of loss of stability.

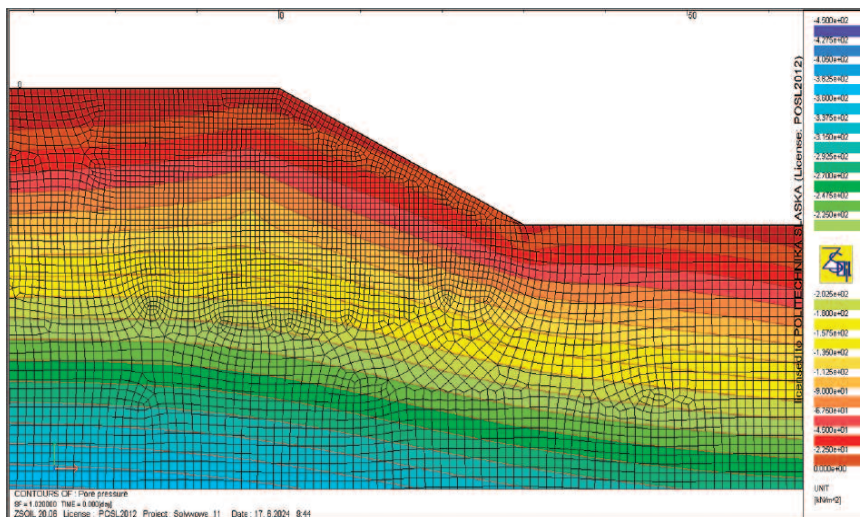


Fig. 3. Pore water pressure map
Rys. 3. Mapa ciśnienia wody w porach

The solution of the filtration problem together with the determined state of primary stresses (taking into account the action of water pore pressures) enables the implementation of stability analysis performed using the $c - \phi$ reduction method. The results of this stage are presented in Fig. 4, where a map of total displacements at the moment of loss of stability is presented. Based on this map, the course of the slide surface can be estimated at the obtained value of the safety factor. In the present case, the obtained surface in a plane cross-section has a shape close to a circle running relatively shallow below the ground surface and passing at the lower edge of the base of the slope. The value of the safety factor obtained at the depth of the water surface at the edge of the backfill of 2.0 m below the surface, corresponding to the above slide surface, was equal to $F_s = 1.02$, which means a very small safety margin, and the slope itself is in unstable equilibrium. Analyzing the Fig. 4, it can be seen that the actual mechanism of sliding may be more complex than slide along a precisely defined surface. Figures 5a and 5b show the influence of both the height of the water surface on the slope surface (a constant water level at the foot of the slope was assumed to be -3.0 m below ground level) and the water flow from heavy rain that penetrates through the surface of the slope on the value of the safety factor. The first relationship is shown in Fig. 5a, and the analyzed water level ranges from -2.0 m up to

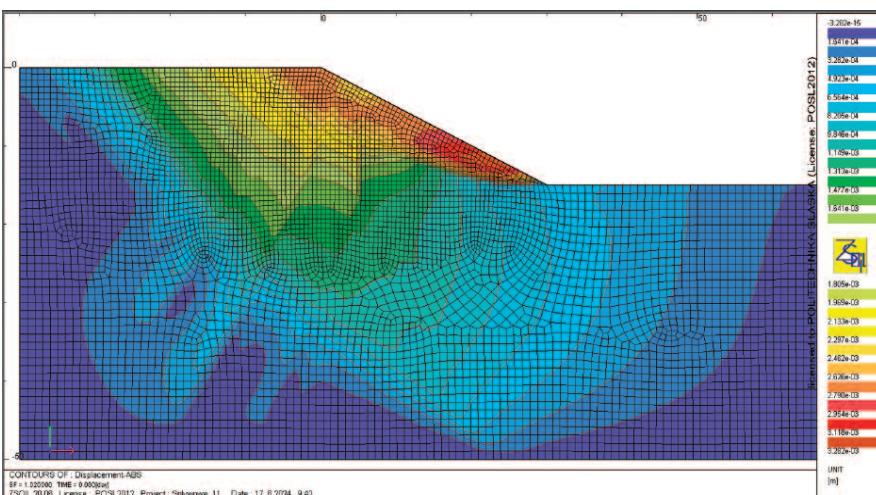


Fig. 4. Map of total displacements at the moment of loss of stability
Rys. 4. Mapa przemieszczeń całkowitych w momencie utraty stateczności

stateczności zbroczy następuje po dłuższej chwili od momentu wystąpienia deszczy, takie założenie może być uznane za właściwe. Linia zerowego ciśnienia oznacza poziom wody w skarpie. W przypadku, gdy linia ta przecina powierzchnię skarpy, to występuje wypływ wody ze skarpy. W praktyce oznacza to bardzo duże zagrożenie utratą stateczności.

Rozwiązanie zagadnienia filtracji wraz z wyznaczonym stanem naprężeń pierwotnych (z uwzględnieniem działania ciśnienia wody w porach) umożliwia analizę stateczności, wykonywaną metodą redukcji $c - \phi$. Na rysunku 4 przedstawiono mapę przemieszczeń całkowitych w momencie utraty stateczności. Na podstawie tej mapy można oszacować przebieg powierzchni zniszczenia przy uzyskanej wartości współczynnika stateczności. W omawianym przypadku uzyskana powierzchnia ma w płaskim przekroju kształt zbliżony do kołowego, przebiegającego relatywnie płytko pod powierzchnią terenu i przechodzącego przy dolnej krawędzi podstawy skarpy. Wartość współczynnika stateczności uzyskana na głębokości zwierciadła wody przy krawędzi naziomu wynoszącego 2,0 m ppt, odpowiadająca powierzchni poślizgu, była równa $F_s = 1,02$. Oznacza to bardzo niewielki zapas bezpieczeństwa, a skarpa znajduje się w równowadze chwiejnej. Analizując rysunek 4 stwierdzono, że rzeczywisty mechanizm zniszczenia może być bardziej złożony niż poślizgu wzdłuż ściśle określonej powierzchni. Na rysunkach 5a i 5b przedstawiono wpływ na wartość współczynnika stateczności zarówno wy-

sokości zwierciadła wody na naziemie skarpy (założono stały poziom wody u podnóża skarpy wynoszący $-3,0$ m ppt), jak i strumienia wody pochodzącej z ulewnej deszczu, który wnika przez powierzchnię skarpy. Pierwszą zależność pokazano na rysunku 5a. Analizowany poziom wody wynosi od $-2,0$ m

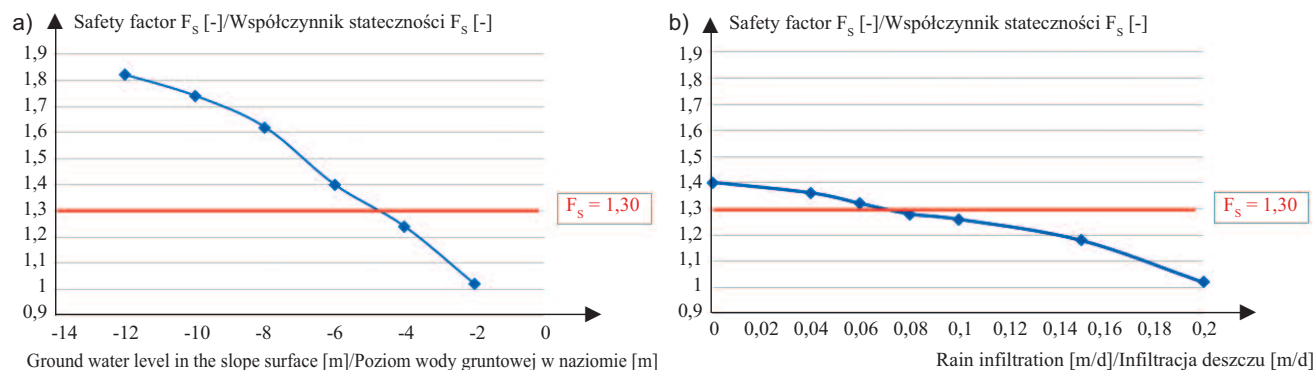


Fig. 5. Dependence of the safety factor value on: a) groundwater level in the slope surface; b) rain infiltration

Rys. 5. Zależność wartości współczynnika stateczności od: a) poziomu wody gruntowej w naziemiu; b) infiltracji deszczu

–12.0 m below ground level. In the latter case, it can be stated that the water level in the slope is low enough that it does not affect the stability. The influence of the rain flow is shown in Fig. 5b, where the values of the flow were analyzed, varying from 0.00 m/d to 0.20 m/d. In this analysis, a constant water level in the slope surface was assumed, which was –6.0 m below ground level.

The obtained results of the analyses allow to state that the water in the slope base and phenomena related to its movement have a huge impact on the obtained value of the safety factor. As a result of the action of the runoff pressure forces, the value of the above factor decreases significantly, which often results, that the slope has not the required safety margin (for the purposes of this analysis, it was assumed that the required F_s should be no less than 1.30). In more extreme cases, F_s reaches the value of 1.00, which already means a very high probability of loss of stability. This may also be an explanation of the mechanism of this type of failures, which in reality occurred after the occurrence of heavy rains.

The dependence of the safety factor value on the depth of the piezometric groundwater level in the slope surface is shown in Fig. 5a. The water level at the base of the slope was constant and amounted to 3.0 m below ground level in all cases. It is easy to see that if the water in the slope is very deep, there is no threat to stability, and the F_s factor is definitely higher than the required value. In the case when this level is higher (at approx. 5.0 m below ground level), the result already drops below the value guaranteeing the expected safety margin. In the case of even shallower water occurrence (2.0 m below ground level), the stability coefficient takes on a value slightly higher than 1.00, which means a very high risk of landslide initiation.

When analyzing the effect of a water stream (e.g. from heavy rain) flowing through the surface of the slope, it is worth analyzing the field of filtration directions in the slope, which is shown in Fig. 6. The field of distribution of flow pressure forces in the slope is very similar, which clearly constitute forces causing the slide of earth masses, which forces can lead to the loss of stability. The relationship presented in Fig. 5b shows that even a relatively small water stream (0.2 m/d, which corresponds to rainfall of 8.3 l/m³·h) can already cause the initiation of earth mass movements in the analyzed example of a slope with an inclination of 1 : 2.0.

ppt do –12,0 m ppt i jest na tyle niski, że nie ma ona wpływu na stateczność skarpy. Wpływ strumienia deszczu przedstawiono na rysunku 5b, gdzie analizowano wartości strumienia zmieniającego się od 0,00 m/d do 0,20 m/d. W tej analizie założono stały poziom wody w naziemiu skarpy, który wynosił –6,0 m ppt.

Na podstawie wyników analiz stwierdzono, że woda w podłożu skarpy i zjawiska związane z jej ruchem mają ogromny wpływ na uzyskaną wartość współczynnika stateczności. Wskutek działania sił ciśnienia spływowego wartość tego współczynnika wyraźnie się zmniejsza, co często powoduje, że skarpa nie odznacza się wymaganym zapasem bezpieczeństwa (na potrzeby analizy przyjęto, że wymagany F_s ma być nie mniejszy niż 1,30). W przypadkach bardziej skrajnych F_s osiąga wartość 1,00, co oznacza już bardzo duże prawdopodobieństwo utraty stateczności. Może to być również wytłumaczeniem mechanizmu awarii, które zaistniały w rzeczywistości po wystąpieniu ulewnych deszczu.

Na rysunku 5a przedstawiona jest zależność wartości współczynnika stateczności od głębokości poziomu piezometrycznego wody gruntowej w naziemiu. Poziom wody w podstawie skarpy był stały i wynosił 3,0 m ppt we wszystkich przypadkach. Nietrudno zauważyć, że jeżeli woda w skarpie jest bardzo głęboko, to żadnego zagrożenia stateczności nie ma, a współczynnik F_s jest zdecydowanie większy niż wymagana wartość. W przypadku gdy poziom ten jest wyższy (ok. 5,0 m ppt), wynik jest mniejszy niż wartość gwarantująca oczekiwany zapas bezpieczeństwa. W przypadku jeszcze płytszego występowania wody (2,0 m ppt), współczynnik stateczności przyjmuje wartość niewiele większą niż 1,00, co oznacza bardzo duże ryzyko inicjacji osuwiska.

Analizując wpływ strumienia wody (np. pochodzącego z ulewnego deszczu) wpływającej przez powierzchnię skarpy, warto przeanalizować pole kierunków filtracji w skarpie, które pokazano na rysunku 6. Bardzo podobne jest pole rozkładu sił ciśnienia spływowego w skarpie, które w ewidentny sposób stanowią siły powodujące zsuwanie mas ziemnych. Siły te mogą doprowadzić do utraty stateczności. Zależność przedstawiona na rysunku 5b pokazuje, że już relatywnie nieduży strumień wody (0,2 m/d, co odpowiada opadom deszczu 8,3 l/m³·h) może już być przyczyną inicjacji ruchów mas ziemnych w analizowanym przykładzie skarpy o nachyleniu 1 : 2,0. Przyjmując, że poziom wody wy-

Assuming that the analyzed water level is -6.0 m below ground level, in the absence of an additional stream of water penetrating through the surface, the safety factor is 1.40. When the flow rate reaches 0.07 m/d, a limit value of 1.30 is obtained, while a value of 0.20 m/d results in a F_s value close to 1.0. The values of the

above-mentioned flow rate are a measure of the amount of water that has penetrated the slope through its surface. In reality, this flow rate cannot be identified with the amount of rainwater, because a significant part of it flows down over the slope surface or is accumulated by vegetation. Due to the lack of convergence of iterative processes, using the $c - \phi$ reduction procedure it is not possible to obtain the safety factor values lower than 1.0, hence it is not possible to perform analyses for higher flow rates. All that is known is that in such cases $F_s < 1.0$, which means a very high probability (bordering on certainty) of the loss of stability. Both this factor and the previously described effect of increasing the water level in the subsoil explain the mechanism of landslides on slopes after periods of excessive rainfall.

Summary and conclusions

The runoff pressure is a very important factor that can have a major impact on the stability of slopes and escarpments. Properly performed stability analyses should describe the soil medium as at least two-phase, consisting of a soil skeleton and water filling the soil pores. Analysis of the soil medium as a single-component medium characterized by total values of strength parameters does not allow for including the water runoff pressure forces in the balance of generalized forces holding and sliding the soil masses. Such interactions would then have to be considered as independent additional loads.

The water level in the subsoil of the slope has a very large impact on its stability. If this level rises, which can occur after heavy rains, the value of the safety factor drops very significantly. Additionally, a very destructive factor is the water flow infiltrating through the surface of the slope, which causes water movement in the subsoil of the slope, causing a significant increase in the value of the runoff pressure forces, which has an impact on a large decrease in the value of the safety factor.

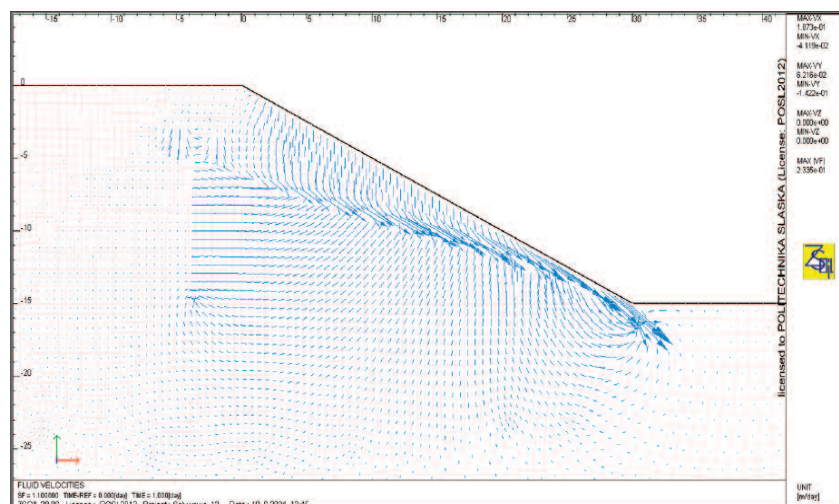


Fig. 6. Direction of additional filtration of rainwater in the subsoil originating from the assumed rain stream penetrating through the slope surface

Rys. 6. Kierunek dodatkowej filtracji wody deszczowej w podłożu pochodzącej od założonego strumienia deszczu wnikażącego przez powierzchnię skarpy

przez jej powierzchnię. W rzeczywistości strumień ten nie może być utożsamiany z ilością wody opadowej, gdyż znaczna jej część spływa po powierzchni zbocza lub jest akumulowana przez roślinność. Ze względu na brak zbieżności procesów iteracyjnych, wykorzystując procedurę redukcji $c - \phi$ nie ma możliwości uzyskania wartości współczynnika stateczności mniejszej niż 1,0. Z tego powodu nie można wykonać analiz w przypadku większych wartości strumienia. Wiadomo, że wówczas $F_s < 1,0$, co oznacza bardzo duże prawdopodobieństwo (graniczące z pewnością) wystąpienia utraty stateczności. Zarówno ten czynnik, jak i opisany wcześniej wpływ na stateczność zwiększenia poziomu wody w podłożu, stanowią wytłumaczenie mechanizmu powstawania osuwisk skarpy i zboczy po okresach wystąpienia ponadnormatywnych deszczy.

Podsumowanie i wnioski

Ciśnienie sphywowe może mieć duży wpływ na stateczność skarpy i zboczy. Właściwie wykonane analizy stateczności powinny opisywać ośrodek gruntowy jako przynajmniej dwufazowy, który składa się ze szkieletu gruntowego i wody wypełniającej pory gruntu. Analiza ośrodka gruntowego jako jednorodnego, charakteryzowanego całkowitymi wartościami parametrów wytrzymałościowych nie pozwala na ujęcie sił ciśnienia sphywowego w bilansie uogólnionych sił utrzymujących i zsuwających masy gruntów. Tego typu oddziaływania musiałyby być wtedy uwzględniane jako dodatkowe.

Bardzo duży wpływ na stateczność ma poziom wody w podłożu skarpy. W przypadku podniesienia się tego poziomu, co może wystąpić po wystąpieniu ulewnych deszczy, wartość współczynnika stateczności bardzo wyraźnie spada. Dodatkowo silnie destrukcyjnym czynnikiem jest strumień wody infiltrujący przez powierzchnię skarpy, który wywołuje ruch wody w podłożu skarpy, powodujący znaczne zwiększenie wartości sił ciśnienia sphywowego, co ma wpływ na zmniejszenie wartości współczynnika stateczności.

Publication financed by the grant of the Rector of the Silesian University of Technology for high-scoring publications no. 03/070/RGJ23/0208.

Received: 03.06.2024.

Revised: 31.07.2024

Published: 21.08.2024

Publikacja finansowana w ramach grantu Rektora Politechniki Śląskiej za publikacje wysoko punktowane nr 03/070/RGJ23/0208.

Wpłynął do redakcji: 03.06.2024 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 31.07.2024 r.

Opublikowano: 21.08.2024 r.

References

- [1] Wiłun Z. Zarys geotechniki. Wyd. 10, Wydawnictwo WKŁ, Warszawa, 2013.
- [2] Norma PN-EN1997-1:2010 (Eurokod 7): Projektowanie geotechniczne – cz. 1: Zasady ogólne.
- [3] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich użytkowanie. Dz.U. z 14 maja 1999 r. nr 43, poz. 430.
- [4] Instrukcja id-3: „Warunki techniczne utrzymania podtorza kolejowego”, PKP Polskie Linie Kolejowe S. A, Warszawa 2009.
- [5] Łupieżowicz M. Analiza stateczności wysokich nasypów autostradowych wykonywanych na terenach zalewisk. Czasopismo Techniczne Politechniki Krakowskiej, Seria: Środowisko, Zeszyt 3-Ś/21, 2011, 123-136.
- [6] Łupieżowicz M. FEM Model for analysing the interaction of a geomatrix with a subsoil, IOP Conference Series: Material Science and Engineering, 7th EuroGeo Conference, Warsaw, vol. 1260, 012033, 2022, DOI: 10.1088/1757-899X/1260/1/012033.
- [7] Bittelli M, Valentino R, Salvatorelli F, Rossi P. Monitoring soil-water and displacement conditions leading to landslide occurrence in partially saturated clays. Geomorphology. 2012; 173 – 174, 161 – 173.
- [8] Sarkar S, Chakraborty M. Stability analysis of homogeneous unsaturated soil slopes by using the variational method. Sādhanā. 2022, <https://doi.org/10.1007/s12046-022-01974-4>.
- [9] Bowles JE. Foundation analysis and design. 2nd ed., McGraw-Hill Book Company, New York, 1977.
- [10] Giani GP. Rock slope stability analysis. Balkena, Rotterdam, 1992.
- [11] Janbu N. Slope stability computations. Wiley (John) and Sons, New York, 1973.
- [12] Lambe TW, Whitman RV. Soil mechanics. John Wiley & Sons, Inc., New York-London-Sydney-Toronto, 1969.
- [13] Boutrup E, Lovell CW. Searching techniques in slope stability analysis. Engineering Geology. 1989; 16 (1-2): 51 – 61.
- [14] Salunkhe D, Chvan G, Bartakke R, Kothavale P. An overview on methods for slope stability analysis. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). 2017; 6.03, 2278-0181.
- [15] Cała M, Flisiak J. Slope stability analysis with FLAC and limit equilibrium methods. FLAC and numerical modeling in geomechanics. CRC Press. 2020; 111-114.
- [16] Hungr O, Salgado FM, Byrne PM. Evaluation of a three-dimensional method of slope stability analysis. Canadian Geotechnical Journal. 1989; 26 (4): 679-686.
- [17] Dawson EM, Roth WH, Drescher A. Slope stability by strength reduction. Geotechnique. 1999; 49 (6), 835-840.
- [18] Seyed-Kolbadi SM, Sadoghi-Yazdi J, Hariri-Ardebili MA. An improved strength reduction-based slope stability analysis. Geosciences. 2019; 9.1: 55.
- [19] Sloan SW. Geotechnical stability analysis. Geotechnique. 2013; 63 (7): 531-571.
- [20] Griffiths DV Lane PA. Slope stability analysis by finite elements. Geotechnique. 1999; 49, 387-403.
- [21] Zheng Y, Tang X, Zhao S, Deng C, Lei W. Strength reduction and step-loading finite element approaches in geotechnical engineering. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2009; 1 (1), 21-30.
- [22] Bagińska I, Izbiński RJ. Niejednorodność ośrodka gruntowego w kinematycznej analizie stateczności zboczy. Górnictwo i Geoinżynieria. 2008; 32 (2), 27-33.
- [23] Meng QX, Wang HL, Xu WY, Cai M, Xu J, Zhang Q. Multiscale strength reduction method for heterogeneous slope using hierarchical FEM / DEM modeling. Computers and Geotechnics. 2019; 115: 103164.
- [24] Ślusarek J, Łupieżowicz M. Analysis of the influence of soil moisture on the stability of a building based on a slope. Engineering Failure Analysis. 2020, DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.104534.
- [25] Yeh HF, Yi-Jin T. Analyzing the effect of soil hydraulic conductivity anisotropy on slope stability using a coupled hydromechanical framework. Water. 2018; 10.7: 905.
- [26] Cała M, Betlej M. Trójwymiarowa analiza stateczności zbocza w skomplikowanych warunkach geologicznych. Górnictwo i Geoinżynieria. 2010; 34 (2), 141-148.
- [27] Cała M, Kowalski M, Stopkiewicz A. The three-dimensional (3D) numerical stability analysis of Hyttemalmen open-pit. Archives of mining science. 2014; 59 (3), 609-620.
- [28] Chakraborty A, Goswami A. State of the art: Three dimensional (3D) slope-stability analysis. International Journal of Geotechnical Engineering. 2016; 10.5, 493 – 498.
- [29] Cho SE. Effects of spatial variability of soil properties on slope stability. Engineering Geology. 2007; 92 (3-4), 97 – 109.
- [30] Batog A, Stilger-Szydło E. Stability of road earth structures in the complex and complicated ground conditions. Studia Geotechnica et Mechanica. 2018; 40 (4), 300-312.
- [31] Marinou V, Stoumpos G, Papazachos C. Landslide hazard and risk assessment for a natural gas pipeline project: The case of the Trans Adriatic Pipeline, Albania Section. Geosciences. 2019; 9.2: 61.
- [32] Wilk S, Galas M, Mijał M. Oddziaływanie osuwisk na gazociągi. Wiertnictwo, Nafta, Gaz. 2005; 22 (1), 379 – 394.
- [33] Kania M. Analiza warunków stateczności budowli w sąsiedztwie zbocza przy różnych efektywnych głębokościach posadowienia. Geoinżynieria Drogi Mosty Tunele. 2007; 03 (14), 22 – 27.
- [34] Urbański A, Grodecki M. Protection of a building against landslide. A case study and FEM simulations. Bulletin of the Polish Academy of Sciences - Technical Sciences. 2019; 67 (3), 657 – 664.
- [35] Jastrzębska M, Łupieżowicz M. Analysis of the causes and effects of landslides in the carpathian flysch in the area of Milówka commune and evaluation of the methods of their prevention. Annals of Warsaw University of Life Science – SGGW, Land Reclamation. 2018; 50 (2), 195 – 211.
- [36] Obrzd R, Truty A. The hardening soil model – A practical guidebook. Z. Soil. PC 100701 report revised 21.08.2018, Zace Services Ltd. Software engineering, Preverenges, 2018.
- [37] Łupieżowicz M. The application of c-φ reduction method to the estimation of the capacity the subsoil under the foundation. ACEE Journal, The Silesian University of Technology. 2013; 6 (4), 35 – 44.
- [38] Gryczmański M. Wprowadzenie do opisu sprężysto-plastycznych modeli gruntów. Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, nr 40, Warszawa, 1995.
- [39] Commend S, Kivell S, Obrzd R, Podleś K, Truty A, Zimmermann T. Computational Geomechanics & Applications with ZSOIL. PC. Zace Services Ltd, Software Engineering, Lausanne, 2020.
- [40] Łupieżowicz M, Kowalska M, Wróblewska M. Analiza czynników mających wpływ na stateczność skarpy pokopalnianej. Materiały Budowlane. 2024; 2, 73 – 78.