

Wytyczne do oceny stateczności skarp nasypów i wykopów w szczególnych warunkach geologiczno-inżynierskich, a także przy wykonywaniu budowli drogowych na terenach górniczych

Zespół autorski:

Prof. dr hab. inż. Marek Cała

Mgr inż. Agnieszka Stopkowicz

Dr inż. Michał Kowalski

Mgr inż. Malwina Kolano

Mgr inż. Mateusz Blajer

Wydział Górnictwa i Geoinżynierii

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

Kraków, 2018 r.

Spis treści

1. Wstęp	4
1.1. Zakres wytycznych.....	4
1.2. Symbole.....	4
2. Podstawy formalno-prawne i wymagania krajowe w zakresie oceny stateczności.....	5
2.1. Aktualnie obowiązujące przepisy prawa w zakresie oceny stateczności	5
Normy.....	5
Rozporządzenia	5
Wytyczne i instrukcje	5
2.2. Zalecenia dotyczące obliczeń stateczności	5
Zalecenia odnośnie warunków dla których należy wykonać ocenę stateczności.....	5
Sprawdzenie stanu granicznego nośności.....	7
Zalecenia dotyczące metod oceny stateczności skarp i zboczy.....	10
Minimalna wartość wskaźnika stateczności	13
3. Wybór metod analizy stateczności skarp nasypów, wykopów oraz podłoża w zależności od stopnia skomplikowania warunków gruntowych.....	15
4. Zalecenia dla analizy stateczności	20
4.1. Zalecenia ogólne	20
Dokumentacje wymagające oceny ogólnej stateczności	20
Planowanie badań w celu oceny stateczności.....	21
Zalecenia do wykonywania obliczeń stateczności	21
4.2. Wybór metod analizy stateczności w odniesieniu do kategorii geotechnicznych	25
4.3. Kryteria oceny stateczności.....	25
4.4. Zalecenia dotyczące opracowań dokumentacji z analizy stateczności	25
4.5. Zalecenia stosowania przestrzennych metod analizy stateczności w odniesieniu do złożoności warunków gruntowych.....	26
4.6. Zalecenia dla analizy stateczności dużych zboczy osuwiskowych.....	26
4.7. Zalecenia dla obliczeń stateczności dla obiektów na terenach górniczych.....	27
4.8. Zalecenia dla analizy stateczności portali tuneli	27
5. Zbiorcze zestawienie rekomendowanych metod analizy stateczności dla poszczególnych typów budowli	29
6. Literatura	30
7. Załączniki	32
Załącznik 1. Minimalny zakres parametrów geotechnicznych do analizy stateczności/analizy przemieszczeń	32

Załącznik 2. Zalecane metody do oceny stateczności.....	34
Załącznik 3. Lista kontrolna.....	35
Załącznik 4. Przykłady obliczeniowe.....	38
Przykład 1	38
Przykład 2	42
Przykład 3	46
Przykład 4	53

1. Wstęp

1.1. Zakres wytycznych

Wytyczne uwzględniają wymagania, zasady i zalecenia dla oceny stateczności na potrzeby rozpoznania warunków gruntowych dla drogownictwa. Celem obliczeń jest ocena ogólnej stateczności zboczy/skarp o danej geometrii oraz/lub przemieszczeń podłoża zbudowanego z gruntów naturalnych lub nasypowych, w sąsiedztwie naturalnych zboczy, fundamentów i konstrukcji oporowych, nasypów lub wykopów. Przedstawione wytyczne należy stosować wraz z „Wytycznymi wykonywania badań podłoża gruntowego na potrzeby budownictwa drogowego. Część 1. Wytyczne badań podłoża budowlanego w drogownictwie. 2018. Praca zbiorowa” oraz z uwzględnieniem aktualnie obowiązujących przepisów i norm.

1.2. Symbole

Oznaczenia zastosowane w wytycznych są zgodne z PN-EN 1997-1.

2. Podstawy formalno-prawne i wymagania krajowe w zakresie oceny stateczności

2.1. Aktualnie obowiązujące przepisy prawa w zakresie oceny stateczności

Poniżej zestawiono najważniejsze normy i przepisy prawa dotyczące oceny stateczności skarp i zboczy.

Normy

PN-EN 1997-1:2008 Eurokod 7 - Projektowanie geotechniczne - Część 1: Zasady ogólne (plus poprawki i erraty).

PN-EN 1997-2:2009 Eurokod 7 - Projektowanie geotechniczne - Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego (plus poprawki i erraty).

PN-EN 1990:2004. Podstawy projektowania konstrukcji.

Rozporządzenia

Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 25 kwietnia 2012 r. w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych (Dz.U. 2012 poz. 463).

Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie (Dz.U. 2016 poz. 124).

Wytyczne i instrukcje

Wysokiński L. Ocena stateczności skarp i zboczy. Zasady wyboru zabezpieczeń. Instrukcja nr 424/2011. Instytut Techniki Budowlanej. Warszawa 2011.

Wytyczne wykonywania badań podłoża gruntowego na potrzeby budownictwa drogowego. Część 1. Wytyczne badań podłoża budowlanego w drogownictwie. 2018. Praca zbiorowa. (nazywane dalej Wytyczne badań podłoża..., 2018)

2.2. Zalecenia dotyczące obliczeń stateczności

Zalecenia odnośnie warunków dla których należy wykonać ocenę stateczności

Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 25 kwietnia 2012 r. w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych (Dz.U. 2012 poz. 463) w §3 ust. 1, punkt 7 wskazuje, że ustalenie geotechnicznych warunków posadowienia polega na ocenie stateczności zboczy, skarp wykopów i nasypów. Przy czym zakres czynności wykonywanych przy ustalaniu geotechnicznych warunków posadowienia zależy od zaliczenia obiektu budowlanego do odpowiedniej kategorii geotechnicznej (pkt. 3 niniejszych wytycznych).

Zgodnie z w/w rozporządzeniem **(Dz.U. 2012 poz. 463) dokumentacja badań podłoża** powinna zawierać między innymi:

- opis metodyki polowych i laboratoryjnych badań gruntów,
- wyniki badań polowych i laboratoryjnych wraz z ich interpretacją,
- model geologiczny,
- zestawienie wyprowadzonych danych geotechnicznych dla każdej z warstw.

PN-EN 1997-2 w rozdziale 6 uszczegóławia zakres dokumentacji badań podłoża.

Projekt geotechniczny powinien zawierać (Dz.U. 2012 poz. 463):

- prognozę zmian właściwości podłoża gruntowego w czasie,
- określenie obliczeniowych parametrów geotechnicznych,
- określenie częściowych współczynników bezpieczeństwa do obliczeń geotechnicznych,
- model obliczeniowy podłoża gruntowego, a w prostych przypadkach przekroju geotechnicznego,
- obliczenia nośności i osiadania podłoża gruntowego,
- obliczenia ogólnej stateczności,
- i inne.

Szczegółowe zalecenia dotyczące projektu geotechnicznego zawiera PN-EN 1997-1 (punkt 2.8).

Zgodnie z rozporządzeniem (Dz.U. 2012 poz. 463) w przypadku obiektów budowlanych zaliczonych do trzeciej kategorii geotechnicznej oraz w złożonych warunkach gruntowych drugiej kategorii wykonuje się dodatkowo dokumentację geologiczną zgodnie z ustawą z dnia 9 czerwca 2011 Prawo geologiczne i górnicze (Dz.U. Nr 163, poz. 981)

Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie (Dz.U. 2016 poz. 124) w załączniku zawiera jednolity tekst Rozporządzenia Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie (Dz. U. Nr 43, poz. 430), z uwzględnieniem dotychczasowych zmian. Rozporządzenie określa warunki techniczne jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i związane z nimi urządzenia budowlane i ich usytuowanie. Warunki techniczne powinny zapewniać m.in. spełnienie wymagań podstawowych dotyczących bezpieczeństwa użytkowania, nośności i stateczności konstrukcji. Wspomniane rozporządzenie stosuje się przy projektowaniu, budowie oraz przebudowie dróg publicznych i związanych z nimi urządzeń budowlanych, a także przy projektowaniu i budowie urządzeń niezwiązanych z drogami publicznymi sytuowanych w ich pasach drogowych. Rozporządzenie w §42 precyzuje parametry geometryczne (pochylenie) skarp nasypów i wykopów, a także warunki w jakich parametry te powinny być określone na bazie obliczeń stateczności. Obliczenia stateczności zgodnie z §42 punkt 4, powinny być wykonywane zgodnie z Polską Normą. Podobne wskazanie powtórzone zostaje w §144, ust 1. Sprawdzenie ogólnej stateczności skarp i zboczy powinno być wykonywane zgodnie z Polską Normą. Ponadto w ust 2. stwierdza się, że **budowla ziemna powinna być tak zaprojektowana, aby „osiadania eksploatacyjne powierzchni korpusu nasypu i podłoża drogowej budowli ziemnej nie przekraczały wartości równej 10 cm, z wyjątkiem styku z obiektem inżynierskim”**. W miejscu styku powinny być zastosowane rozwiązania konstrukcyjne zapobiegające powstaniu uskoku, a osiadania nasypu powinny być równe osiadaniu obiektu inżynierskiego i nie powinny powodować deformacji profilu nawierzchni. Należy je obliczyć według Polskiej Normy. Obliczenia osiadania nasypu i podłoża budowli ziemnej mogą być pominięte, jeśli do głębokości strefy aktywnej, określonej zgodnie z Polską Normą, występują grunty:

- skaliste i kamieniste,
- niespoiste (drobnoziarniste i gruboziarniste w stanie średnio zagęszczonym, zagęszczonym lub bardzo zagęszczonym),
- spoiste w stanie zwartym, półzwartym i twardoplastycznym.

Sprawdzenie stanów granicznych przydatności do użytkowania drogowej budowli ziemnej, których przekroczenie uniemożliwia eksploataowanie budowli ziemnej na skutek

jej odkształceń, przemieszczeń lub drgań, powinno być wykonane zgodnie z Polską Normą,

Parametry stanu granicznego przydatności do użytkowania ścian oporowych określa Polska Norma.

PN-EN 1997-1 – w rozdziale 11 przedstawia zasady i reguły dotyczące stateczności ogólnej. Postanowienia tego rozdziału należy stosować *do ogólnej stateczności i przemieszczeń podłoża zbudowanego z gruntów naturalnych lub nasypowych, w sąsiedztwie fundamentów, konstrukcji oporowych, naturalnych zboczy, nasypów i wykopów (11.1.(1)P)*. Rozdział 12 zawiera ustalenia stosowane *do nasypów, tworzących małe zapory ziemne oraz infrastrukturę komunikacyjną (12.1.(1)P)*.

Do typowych konstrukcji, dla których należy wykonać analizy stateczności, zalicza się (11.4.(4)):

- konstrukcje oporowe podtrzymujące grunt,
- wykopy, skarpy lub nasypy,
- fundamenty na pochyłym terenie, naturalnych zboczach lub nasypach,
- fundamenty w pobliżu wykopu, przekopy lub konstrukcje podziemne, nabrzeża.

Należy rozważyć wszystkie możliwe stany graniczne danego podłoża, aby były spełnione wymagania dotyczące stateczności, dopuszczalnych odkształceń, trwałości i dopuszczalnych przemieszczeń sąsiednich budowli (11.2.1(P)).

W 11.2(2) wskazano typowe stany graniczne:

- utrata stateczności ogólnej podłoża i związanych z nim budowli,
- nadmierne przemieszczenia,
- zniszczenie lub utrata użyteczności.

Rozdział 12 wyszczególnia listę dodatkowych stanów granicznych dla nasypów m.in. osuwisko skarpy lub korony nasypu, zniszczenie wywołane erozją wewnętrzną, powierzchniową lub podmyciem.

Sprawdzenie stanu granicznego nośności

PN-EN 1997-1 w rozdziale 11 *Stateczność ogólna* przedstawia zalecenia do obliczeń dla oceny ogólnej stateczności i przemieszczeń podłoża. Rozdział 12 *Budowle ziemne* dotyczy nasypów tworzących małe zapory ziemne oraz infrastrukturę komunikacyjną.

W rozdziale 11 *Stateczność ogólna*, w punkcie 11.5 Sprawdzenie stanu granicznego nośności, stwierdza się (w 11.5.1.):

(1)P „Ogólną stateczność skarp, z uwzględnieniem wpływu istniejących i planowanych konstrukcji, należy sprawdzić ze względu na stany graniczne nośności (GEO i STR), przyjmując obliczeniowe wartości oddziaływań, oporów i wytrzymałości, do których należy stosować współczynniki częściowe określone w A.3.1(1)P, A.3.2(1)P i A.3.3.6(1)P.”

(2)P „Przy analizie ogólnej stateczności podłoża zbudowanego z gruntów i skał, należy wziąć pod uwagę wszystkie stosowne sposoby zniszczenia”.

W przypadku oceny stateczności ogólnej przy doborze oddziaływań do obliczeń stanów granicznych należy uwzględnić wykaz podany w 2.4.2(4). Dotyczy to także budowli

ziemnych, dla których należy rozważyć sytuacje obliczeniowe zgodnie z punktem 2.2 PN-EN 1997-1.

Ocenie podlegają zatem sytuacje projektowe uwzględniające między innymi proces budowy, wcześniejsze lub trwające ruchy osuwiskowe, istniejące i planowane konstrukcje, oddziaływania zewnętrzne, wpływ działalności człowieka, zmiany warunków wodnych itp.

Zgodnie z zapisami PN-EN 1997-1, rozpatrując stan graniczny zniszczenia bądź nadmiernego odkształcenia elementu konstrukcyjnego lub części podłoża (STR i GEO), należy wykazać, że:

$$E_d \leq R_d \text{ lub } \frac{R_d}{E_d} \geq 1 \quad (1)$$

gdzie:

E_d - wartość obliczeniowa efektu oddziaływań,

R_d - wartość obliczeniowa oporu granicznego podłoża.

Bądź wyznaczyć wskaźnik wykorzystania nośności (określany także jako opór wyczerpania nośności):

$$\Lambda_{GEO} = \frac{E_d}{R_d} - \text{warunki są nieakceptowalne jeżeli wskaźnik jest } > 100\%. \quad (2)$$

Współczynniki częściowe mogą być stosowane do samych oddziaływań (F_{rep}) albo ich efektów (E):

$$E_d = E \left\{ \gamma_F F_{rep}; \frac{X_k}{\gamma_m}; a_d \right\} \quad (3)$$

lub

$$E_d = \gamma_E E \left\{ F_{rep}; \frac{X_k}{\gamma_m}; a_d \right\} \quad (4)$$

Podczas określenia oporów (nośności) obliczeniowej współczynniki częściowe mogą być stosowane do parametrów gruntów (X), albo do oporów (nośności) R , jak i do obu tych wielkości:

$$R_d = R \left\{ \gamma_F F_{rep}; \frac{X_k}{\gamma_m}; a_d \right\} \quad (5)$$

lub

$$R_d = E \left\{ \gamma_F F_{rep}; X_k; a_d \right\} / \gamma_R \quad (6)$$

lub

$$R_d = R \left\{ \gamma_F F_{rep}; \frac{X_k}{\gamma_M}; a_d \right\} / \gamma_R \quad (7)$$

Do obliczeń stateczności wartości obliczeniowe:

- oddziaływań należy określić bezpośrednio lub wyprowadzić z wartości reprezentatywnych wg wzoru:

$$F_d = \gamma_F F_{rep}, \text{ gdzie } F_{rep} = \psi F_k$$

- parametrów geotechnicznych należy wyprowadzić z wartości charakterystycznych wg wzoru:

$$X_d = \frac{X_k}{\gamma_M}$$

albo oceniać bezpośrednio,

- danych geometrycznych, w przypadku wystąpienia odchylek w danych geometrycznych, mających znaczny wpływ na niezawodność konstrukcji, wartości obliczeniowe należy albo wyznaczyć bezpośrednio albo z wartości nominalnych wg wzoru:

$$a_d = a_{nom} \pm \Delta a$$

Występowanie niewielkich odchylek zostało już zawarte we współczynnikach (γ_F, γ_M).

Generalnie do oceny stateczności można zastosować jedno z trzech podejść obliczeniowych wprowadzonych przez PN-EN 1997-1. W Polsce zgodnie z załącznikiem krajowym do oceny stateczności stosuje się podejście 3 (Tabela 1.1). Współczynniki częściowe zostały podzielone na trzy grupy i uwzględniają współczynniki stosowane do oddziaływań lub ich efektów (A), współczynniki stosowane do parametrów gruntów (M) oraz współczynniki stosowane do oporów występujących na powierzchni poślizgu (R).

W podejściu DA3, dla analizy stateczności skarp i stateczności ogólnej oddziaływania na podłoże gruntowe (oddziaływania konstrukcji, obciążenie ruchem) traktuje się jako oddziaływanie geotechniczne i stosuje się zestaw współczynników obciążeniowych A2, tj. uwzględnia się współczynniki do oddziaływań zmiennych. W DA3 uwzględnia się także współczynniki dla parametrów wytrzymałościowych.

DA3 jest najczęściej stosowanym (63% krajów CEN) podejściem obliczeniowym do oceny stateczności skarp (Bond et al., 2008). Podejście DA1 stosuje 25% krajów zrzeszonych w CEN, a DA2 tylko Hiszpania. DA3 do oceny stateczności ogólnej wybrano także w Polsce (PN-EN 1997-1/Ap2, 2010). Przy sprawdzaniu stanów granicznych nośności podłoża (GEO) dla stateczności ogólnej stosuje się współczynniki częściowe A2+M2+R3, dla pozostałych stanów granicznych podejście obliczeniowe 2 (A1+M1+R2).

Tabela 1. 1. Zestawienie współczynników częściowych przy sprawdzeniu stanów granicznych nośności (GEO)

Współczynniki częściowe			Podejście obliczeniowe			
			2 (DA2)		3 (DA3)	
A	Oddziaływania stałe γ_G	niekorzystne	A1	1,35	A2	1,0*
		korzystne		1,0		1,0
	Oddziaływania ziemne γ_Q	niekorzystne		1,5		1,3*
		korzystne		0		0
M	Parametry gruntu	Kąt tarcia wewnętrznego γ_{φ}^{**}	M1	1,0	M2	1,25
		Spójność efektywna $\gamma_{c'}$		1,0		1,25
		Wytrzymałość na ścinanie bez odpływu γ_{cu}		1,0		1,4
		Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie γ_{qu}		1,0		1,4

	Ciężar objętościowy γ		1,0		1,0
R	Opór ścinania gruntu $\gamma_{R;e}$	R2	1,1	R3	1,0

*oddziaływania geotechniczne,

** redukuje się tangens kąta tarcia wewnętrznego.

PN-EN 1997-1 nie wskazuje wytycznych kiedy należy prowadzić analizy z uwzględnieniem warunków z odpływem i bez odpływu. Orr i Farrell (1999) stwierdzają, że **warunki długotrwale są kluczową sytuacją projektową i dlatego analiza z odpływem jest tu odpowiednia, ale warunki bez odpływu są kluczowe dla sytuacji nasypów na słabym gruncie**. Warunki z odpływem powinny być uwzględnione dla stanów granicznych dla warunków zawodnionych. Jeżeli deformacje w obrębie utworów drobnoziarnistych mogą się rozwijać w czasie, wówczas efektywna spójność będzie najprawdopodobniej stosunkowo niska i należy ostrożnie szacować wartość c_k' . Generalnie warunki bez odpływu powinny zostać uwzględnione dla projektowania skarp w utworach spoistych, dla których wymagana jest stateczność w warunkach krótkotrwałych (np. nasypy wykonywane w krótkim okresie czasu, wykopy pod fundamenty). Okres czasu kiedy utwory spoiste będą charakteryzować się warunkami bez odpływu będzie zależeć od natury gruntu oraz historii naprężeń. Powinno to być uwzględnione jako część procesu projektowania w celu określenia czy analiza w warunkach bez odpływu jest właściwa.

Zalecenia dotyczące metod oceny stateczności skarp i zboczy

PN-EN 1997-1 w rozdziale 11 zaleca, aby masyw gruntu lub skały, ograniczony powierzchnią poślizgu, był traktowany jako ciało sztywne lub jako kilka ciał sztywnych, poruszających się równocześnie (11.5.1.(4)). Powierzchnie poślizgu lub powierzchnie kontaktu pomiędzy sztywnymi blokami mogą mieć różne kształty m.in. płaski, walcowy oraz bardziej skomplikowane. Alternatywnie, stateczność można sprawdzać z wykorzystaniem analizy granicznego stanu naprężeń lub metody elementów skończonych.

PN-EN 1997-1 zaleca:

- Dla materiałów względnie jednorodnych i izotropowych zastosowanie walcowej powierzchni poślizgu.
- W przypadku ośrodka uwarstwionego, szczególnie w przypadku występowania warstwy o małej wytrzymałości, analizy powierzchni poślizgu innych niż walcowe.
- W materiałach z nieciągłościami, wykonanie analizy trójwymiarowych klinów.
- Dla zboczy osuwiskowych, w których powtórnie mogą zostać uruchomione osuwiska, wykonanie analizy wzdłuż walcowych, jak i niewalcowych powierzchni poślizgu. Wartości współczynników częściowych zwykle stosowane do analiz stateczności ogólnej, mogą nie być w tym przypadku właściwe.
- Rozważenie trójwymiarowych powierzchni poślizgu, w przypadku, gdy dwuwymiarowa powierzchnia poślizgu nie może być przyjęta.
- Dla ciężaru gruntu zastosowanie jego dolnej i górnej wartości charakterystycznej, gdyż przy wyznaczaniu najbardziej niekorzystnej powierzchni poślizgu może nie być możliwe określenie czy ciężar działa korzystnie czy niekorzystnie.

- Dla analizy naturalnych zboczy, wykonanie pierwszego obliczenia z wykorzystaniem parametrów charakterystycznych przed rozpoczęciem projektowania, co dostarczy informacji o globalnym współczynniku bezpieczeństwa. Zaleca się wykorzystanie doświadczeń i procedur badawczych z porównywalnych przypadków.

PN-EN 1997-1 zaleca, aby analiza stateczności skarpy uwzględniała sprawdzenie całkowitego momentu i pionowej stateczności bryły odłamu. Jeżeli nie sprawdza się równowagi poziomej, siły pomiędzy paskami zaleca się przyjmować za poziome. Z tego względu niektóre metody równowagi granicznej nie spełniają powyższych wymagań. Krahn (2004, za Bond et al. 2013) wyszczególnił metody równowagi granicznej, które spełniają powyższe wymagania (Tabela 1.2), a także zestawiał informacje odnośnie sił oddziałujących między paskami (Tabela 1.3). Z danych w tabelach 1.2 i 1.3 wynika, że (za Bond et al., 2013):

- Metoda Spencera jest akceptowana, ponieważ warunek równowagi momentów oraz sił jest spełniony.
- Metoda Bishopa Simplified jest akceptowana, gdyż równowaga momentów jest uwzględniona, a kiedy równowaga sił nie jest spełniona, uwzględniane są poziome siły oddziałujące pomiędzy paskami.
- Metoda Janbu Simplified została wykluczona ze względu na brak spełnienia warunku równowagi momentów sił.
- Metoda Felleniusa (Ordinary) została wykluczona. Spełnia ona warunek równowagi momentów, jednak nie spełnia warunku równowagi sił oraz oddziaływania między paskami nie są poziome.

Tabela 1. 2. Warunki równowagi w metodach równowagi granicznej (Krahn, 2004, za Bond et al., 2013)

Metoda	Równowaga momentów	Równowaga sił
Felleniusa	Tak	Nie
Bishopa Simplified	Tak	Nie
Janbu Simplified	Nie	Tak
Spencera	Tak	Tak
Morgersterna-Price'a	Tak	Tak
Janbu Generalized	Tak (przez paski)	Tak
Sarmy (pionowe paski)	Tak	Tak

Tabela 1. 3. Charakterystyka sił oddziałujących na paski oraz ich relacje (Krahn, 2004, za Bond et. al., 2013)

Metoda	Składowa normalna (E)	Składowa styczna (X)	Nachylenie X/E oraz zależności X-E
Felleniusa	Nie	Nie	Brak sił oddziałujących między paskami
Bishopa Simplified	Tak	Nie	Poziome
Janbu Simplified	Tak	Nie	Poziome
Spencera	Tak	Tak	Stałe
Morgersterna-Price'a	Tak	Tak	Zmienne, zależne od założeń użytkowania
Janbu Generalized	Tak	Tak	Zastosowana linia zasięgu oraz równowagi momentu paska
Sarma (pionowe paski)	Tak	Tak	$X = C + E \cdot \tan \varphi$

Powyższe ograniczenia należy mieć na uwadze wybierając metody obliczeniowe do analizy stateczności metodami równowagi granicznej.

Analiza stateczności zboczy i wykopów w masywach skalnych

PN-EN 1997-1 wskazuje, aby stateczność zboczy i wykopów w masywie skalnym sprawdzić analizując możliwość zniszczenia przez zsuw lub obrót, obejmujący bloki skalne lub duże masywy skał. Ocenic także należy możliwość obrywów luźnych bloków. Należy zwrócić uwagę na ciśnienie wody filtracyjnej w szczelinach i spękaniach, a także rozpatrując stateczność długotrwałą uwzględnić wpływ czynników środowiskowych, roślinności i zanieczyszczeń.

Analiza stateczności powinna bazować na dobrej znajomości układów nieciągłości oraz wytrzymałości nienaruszonej skały i nieciągłości. Możliwe schematy zniszczenia to:

- poślizg bloków lub klinów skalnych,
- obryw bloków lub płyt,
- połączony obryw i poślizg.

Literatura wskazuje także na możliwość wystąpienia innych schematów zniszczenia jak np. zjawisk typu *toppling* (obalenie).

W przypadku masywów skalnych mocno spękanych oraz miękkich skał i gruntów scementowanych, powierzchnia poślizgu może charakteryzować się kształtem walcowym lub zbliżonym do walcowego.

Stateczność wykopów

Zgodnie z PN-EN 1997-1 należy sprawdzić stateczność ogólną podłoża w pobliżu wykopu, łącznie z odkładem gruntu z wykopu i konstrukcjami, drogami i uzbrojeniem.

Stateczność dna wykopu należy sprawdzić, uwzględniając obliczeniowe ciśnienia wody w porach gruntu. Należy także przeprowadzić analizę zniszczenia hydraulicznego oraz rozważyć możliwość wypiętrzenia dna głębokich wykopów na skutek odciążenia.

Minimalna wartość wskaźnika stateczności

Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie (Dz.U. 2016 poz. 124) ogłoszone 29.01.2016 r. niesie zmiany w zakresie przepisów dotyczących oceny stateczności. Dotychczasowe zapisy Rozporządzenia (Dz.U. 1999 nr 43 poz. 430) wskazywały w Dziale V, Rozdział 2, § 144 pkt. 2, że: „Pochylenia skarp nasypów i wykopów powinny być zgodne z wymaganiami, o których mowa w § 42. Wskaźniki stateczności skarp i zboczy określane indywidualnie metodami podanymi w Polskich Normach nie powinny być mniejsze niż 1,5.” W aktualnej wersji Rozporządzenia (Dz.U. 2016 poz. 124) zapis ten został usunięty. Wprowadzenie zmian w Rozporządzeniu (Dz.U. 2016 poz. 124), gdzie zostały pominięte zapisy odnośnie wartości minimalnej wskaźnika stateczności oraz zalecanej wartości obciążenia od ruchu kołowego, może doprowadzić do pewnych nieporozumień i niejasności w zakresie wymaganego zapasu bezpieczeństwa podczas obliczeń stateczności. Eurokod 7 wprowadził zmianę w podejściu do obliczeń stateczności. Dotychczas wyznaczano globalny wskaźnik stateczności, który odnoszono do wymaganego zapasu bezpieczeństwa dla danej konstrukcji. PN-EN 1997-1 dla sprawdzenia stanów granicznych wskazuje współczynniki częściowe, które stosuje się do określenia obliczeniowych wartości wytrzymałości, oddziaływań i oporu gruntu.

W obliczeniach stateczności wg PN-EN 1997-1 można zastosować jedno z trzech podejść obliczeniowych. Przy czym załącznik krajowy wskazuje do oceny stateczności ogólnej podejście 3 (DA3). Obliczenia mają na celu sprawdzenie stanów granicznych nośności (GEO STR), przyjmując obliczeniowe wartości oddziaływań, oporów i wytrzymałości. Dla oceny stateczności ogólnej dla stanów granicznych nośności (GEO) należy stosować współczynniki częściowe $A_2+M_2+R_3$ (Tabela 1.1.). Dla pozostałych stanów granicznych stosuje się podejście 2 i zestaw współczynników częściowych $A_1+M_1+R_2$.

Zgodnie z zapisami PN-EN 1997-1, rozpatrując stan graniczny zniszczenia bądź nadmiernego odkształcenia elementu konstrukcyjnego lub części podłoża (STR i GEO), należy wykazać, że:

$$E_d \leq R_d \text{ lub } \frac{R_d}{E_d} \geq 1 \quad (1)$$

gdzie:

E_d - wartość obliczeniowa efektu oddziaływań,

R_d - wartość obliczeniowa oporu granicznego podłoża.

i/lub określić wskaźnik wykorzystania nośności:

$$\Lambda_{GEO} = \frac{E_d}{R_d} - \text{warunki są nieakceptowalne jeżeli wskaźnik jest } > 100\%. \quad (2)$$

W 2.4.6.2 stwierdza się:

Uwaga 2 Wartości zalecane w Załączniku A określają poziom bezpieczeństwa odpowiedni dla konwencjonalnych sposobów projektowania.

2.4.6.2(3) Jeśli wartości obliczeniowe parametrów geotechnicznych są oceniane bezpośrednio, to wartości współczynników częściowych zalecane w Załączniku A można stosować jako wskazówki dla wymaganego poziomu bezpieczeństwa.

Wysokiński (2011) stwierdza odnośnie podejścia obliczeniowego 3: *W podejściu tym powinno się stosować maksymalne parametry obliczeniowe tj. ustalone na podstawie doświadczeń lub obliczeń osuwisk w momencie utraty równowagi $F^1=1,0$. W takim przypadku parametry wytrzymałościowe oceniane są jako rzeczywiste w momencie wystąpienia stanu granicznego. Zapas bezpieczeństwa w stosunku do tego stanu będzie wystarczający, gdy po zabezpieczeniu wartość F będzie $F=1,3$ lub $F=1,5$ jak to się najczęściej przyjmuje.*

Bond et al. (2008) stwierdzają, że w tradycyjnej analizie stateczności wyznaczając globalną wartość wskaźnika stateczności sprawdzano czy charakteryzuje się on wymaganym zapasem bezpieczeństwa. Zapas bezpieczeństwa zależał od przewidywanego poziomu ryzyka („ważności” obiektu). W Eurokodzie 7 jeden zestaw współczynników (Tabela 1.1) jest zalecany dla wszystkich typów obiektów i może prowadzić to do pomijania efektu skali. Z tego względu Bond et al. (2008) rekomendują stosowanie współczynników częściowych (Tabela 1.1) dla „typowych” obiektów oraz poziomów ryzyka. Gdy ryzyko dla życia i mienia jest oceniane jako duże (Tabela 4.2), powinny zostać rozważone wyższe wartości współczynników częściowych. Zwiększenie wartości współczynników częściowych może jednak zaburzyć obraz warunków stateczności i nie odwzorowywać rzeczywistego mechanizmu zniszczenia, dlatego wydaje się, że zabieg ten należy stosować z dużą ostrożnością.

Dotychczas w Polsce, na podstawie Rozporządzenia (Dz.U. 1999 nr 43 poz. 430) uwzględniano obciążenie od ruchu kołowego o wartości 25 kPa. Zaleca się stosowanie wartości obciążenia od ruchu kołowego zgodnie z obowiązującymi przepisami oraz w odniesieniu do warunków pracy danego obiektu.

Należy przeprowadzić analizy z uwzględnieniem czasu trwania obciążenia oraz określenie właściwych parametrów gruntu dla oceny stateczności. Projektant powinien rozważyć to, że część obciążeń działa tylko przez krótki okres czasu, zatem w tych przypadkach, ośrodek może odpowiadać warunkom bez odpływu przez cały okres przyłożonego oddziaływania.

¹ F – wskaźnik stateczności.

3. Wybór metod analizy stateczności skarp nasypów, wykopów oraz podłoża w zależności od stopnia skomplikowania warunków gruntowych

Wybór metody analizy stateczności powinien uwzględniać szereg czynników, a najważniejsze z nich to:

- złożoność warunków gruntowych i obiektu budowlanego,
- możliwe mechanizmy zniszczenia,
- możliwość uwzględnienia oddziaływań zewnętrznych i zmian warunków wodnych,
- możliwość wykonania reprezentatywnego przekroju (2D),
- zmienność przestrzenna budowy geologicznej, warunków hydrogeologicznych i analizowanego zjawiska (3D).

Bazując na Rozporządzeniu Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 25 kwietnia 2012 r. w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych (Dz.U.2012.0.463), zagadnienia analizy stateczności można ogólnie rozróżnić z uwzględnieniem podziału na kategorie geotechniczne obiektu budowlanego:

1) pierwsza kategoria geotechniczna, która obejmuje posadawianie niewielkich obiektów budowlanych, o statycznie wyznaczalnym schemacie obliczeniowym w prostych warunkach gruntowych, w przypadku których możliwe jest zapewnienie minimalnych wymagań na podstawie doświadczeń i jakościowych badań geotechnicznych, takich jak:

- a) 1- lub 2-kondygnacyjne budynki mieszkalne i gospodarcze,
- b) ściany oporowe i rozparcia wykopów, jeżeli różnica poziomów nie przekracza 2,0 m,
- c) wykopy do głębokości 1,2 m i nasypy budowlane do wysokości 3,0 m wykonywane w szczególności przy budowie dróg, pracach drenażowych oraz układaniu rurociągów;**

2) druga kategoria geotechniczna, która obejmuje obiekty budowlane posadawiane w prostych i złożonych warunkach gruntowych, wymagające ilościowej i jakościowej oceny danych geotechnicznych i ich analizy, takie jak:

- a) fundamenty bezpośrednie lub głębokie,
- b) ściany oporowe lub inne konstrukcje oporowe, z zastrzeżeniem pkt 1 lit. b, utrzymujące grunt lub wodę,**
- c) wykopy, nasypy budowlane, z zastrzeżeniem pkt 1 lit. c oraz inne budowle ziemne,**
- d) przyczółki i filary mostowe oraz nabrzeża,
- e) kotwy gruntowe i inne systemy kotwiące;

3) trzecia kategoria geotechniczna, która obejmuje:

- a) obiekty budowlane posadawiane **w skomplikowanych warunkach gruntowych,**
- b) nietypowe obiekty budowlane niezależnie od stopnia skomplikowania warunków gruntowych, których wykonanie lub użytkowanie może stwarzać poważne zagrożenie dla użytkowników, takie jak: obiekty energetyki, rafinerie, zakłady chemiczne, zapory wodne i inne budowle hydrotechniczne o wysokości piętrzenia powyżej 5,0 m, budowle stoczniowe,

wyspy morskie i platformy wiertnicze oraz inne skomplikowane budowle morskie, lub których projekty budowlane zawierają, nieznajdujące podstaw w przepisach, nowe niesprawdzone w krajowej praktyce rozwiązania techniczne,

c) obiekty budowlane zaliczane do inwestycji mogących zawsze znacząco oddziaływać na środowisko, określone w rozporządzeniu Rady Ministrów z dnia 9 listopada 2010 r. w sprawie przedsięwzięć mogących znacząco oddziaływać na środowisko (Dz. U. Nr 213, poz. 1397),

d) budynki wysokościowe projektowane w istniejącej zabudowie miejskiej,

e) obiekty wysokie, których głębokość posadowienia bezpośredniego przekracza 5,0 m lub które zawierają więcej niż jedną kondygnację zagłębioną w gruncie,

f) tunele w twardych i niespękanych skalach, w warunkach niewymagających specjalnej szczelności,

g) obiekty infrastruktury krytycznej,

h) obiekty zabytkowe i monumentalne.

Warunki gruntowe w przypadku stwierdzenia występowania niekorzystnych zjawisk geologicznych, zwłaszcza zjawisk i form krasowych, osuwiskowych, sufozyjnych, kurzawkowych, glaciektonicznych, gruntów ekspansywnych i zapadowych (...) zaliczyć należy do skomplikowanych (§4 ust. 2, punkt 3). Rozporządzenie w §4 ust. 3, punkt 3 zalicza obiekty budowlane posadowione w skomplikowanych warunkach gruntowych do trzeciej kategorii geotechnicznej.

Bazując na zapisach Rozporządzenia, w przypadku nasypów i wykopów drogowych występować będzie:

- pierwsza kategoria geotechniczna, gdy w prostych warunkach gruntowych wykonywane będą wykopy do głębokości 1,2 m i nasypy budowlane do wysokości 3,0 m;
- druga kategoria geotechniczna, gdy w warunkach prostych lub złożonych wykonywane będą wykopy o głębokości powyżej 1,2 m oraz nasypy o wysokości ponad 3,0 m;
- trzecia kategoria geotechniczna przypisywana dla obiektów realizowanych w skomplikowanych warunkach gruntowych. Tunele zgodnie z Rozporządzeniem zaliczane będą do trzeciej kategorii geotechnicznej.

Pomimo popularności analiz stateczności skarp w płaskich przekrojach należy zwrócić uwagę na ich ograniczenia wynikające ze znacznej idealizacji zagadnienia. Powszechnie uważa się, że wartość wskaźnika stateczności w obliczeniach 2D jest mniejsza niż w obliczeniach 3D. Zwraca na to uwagę chociażby Cavounidis (1987). Gens et al. (1988) oraz Mowen et al. (2011) stwierdzili, że różnica ta może dochodzić w niektórych przypadkach nawet do 30%. Nie jest to jednak regułą (Vaughan, 2008). Stwierdzenie to jest prawdziwe tylko, jeśli przekrój jest prostopadły do powierzchni skarpy/zbocza. W rzeczywistości warunek ten nie zawsze można spełnić. Griffiths i Marquez (2007) zwracają uwagę, że konserwatywnego wyniku w obliczeniach 2D można być pewnym wtedy, gdy wybierzemy najbardziej pesymistyczny przekrój, wybór który nie zawsze może być oczywisty. Z kolei, na co zwracają uwagę Arellano i Stark (2000), następstwem wykonania analizy odwrotnej w płaskiej analizie stateczności może okazać się przeszacowanie wytrzymałości gruntu na ścinanie.

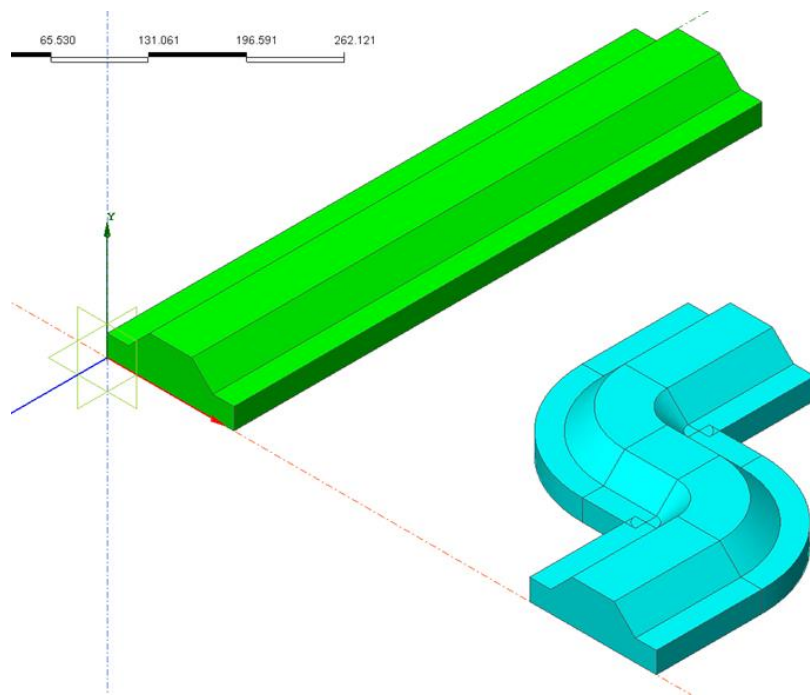
Ze względu na czasochłonność i ogromny nakład pracy związany z przestrzenną analizą stateczności, konieczne jest określenie kryteriów wyboru pomiędzy obliczeniami w Płaskim Stanie Odkształcenia (2D), a obliczeniami w Przestrzennym Stanie Naprężenia (3D). Opisane poniżej kryteria zaczerpnięto z pracy Kowalskiego (2014).

Jednym z najważniejszych kryteriów wyboru pomiędzy obliczeniami 2D a obliczeniami 3D jest zmienność geometrii analizowanego zbocza. Obliczenia w Płaskim Stanie Odkształcenia (PSO) zakładają liniowość obiektu w kierunku prostopadłym do analizowanego przekroju i w zasadzie tylko w takim przypadku wyniki obliczeń są prawidłowe. Przykład takiego obiektu przedstawiono kolorem zielonym na rysunku 3.1. W przypadku obiektu o zmiennej geometrii (kolor niebieski na rysunku 3.1), tylko obliczenia w warunkach 3D pozwolą uwzględnić jego przestrzenny charakter.

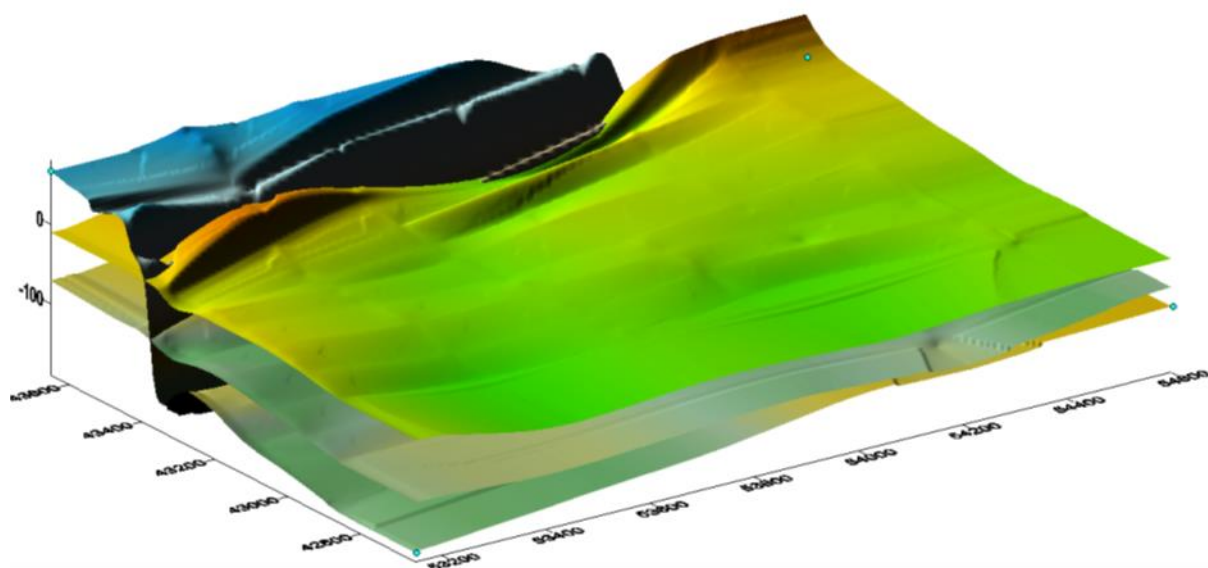
Następnym kryterium decydującym o wyborze pomiędzy obliczeniami 2D/3D jest układ warstw geologicznych/geotechnicznych w analizowanym zboczu. Najprostsza jest sytuacja, gdy zbocze jest jednorodne, co z reguły kwalifikuje je do obliczeń 2D. Ten wariant obliczeń dobrze sprawdza się również w przypadku, gdy powierzchnie warstw geologicznych są w przybliżeniu prostopadłe do płaszczyzny przekroju. W przypadku warstw geologicznych o bardziej skomplikowanym układzie (silne pofałdowania, uskoki, występowanie soczewek) należy skłaniać się do przeprowadzania obliczeń przestrzennych. Sytuację dodatkowo może komplikować fakt występowania wody, szczególnie jeżeli część warstw jest wodonośnych, a część nieprzepuszczalnych.

Kolejnym kryterium jest występowanie dodatkowych obciążeń znajdujących się na analizowanych obiektach. Obciążenia takie z reguły są przykładane do powierzchni, np. od istniejących na zboczu budowli, ale mogą być również związane z deformacjami powierzchni terenu, np. na skutek eksploatacji górniczej.

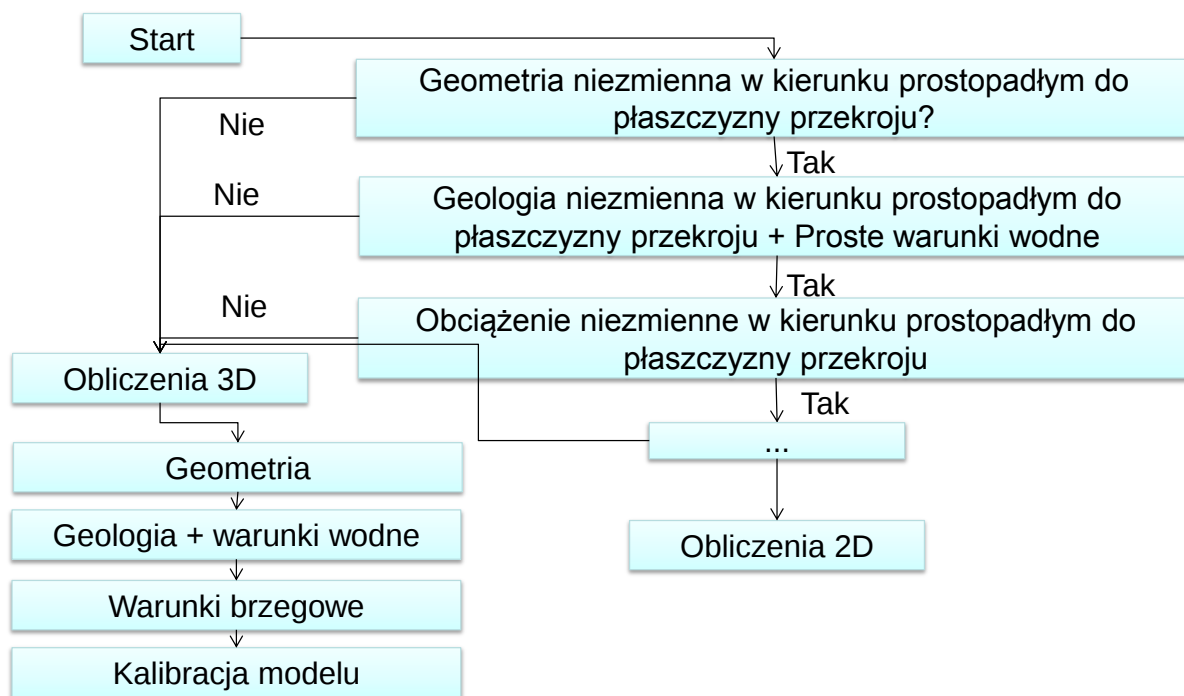
Na rysunku 3.3 przedstawiono schemat postępowania pozwalający na stwierdzenie, czy zasadne jest przeprowadzanie obliczeń w Przestrzennym Stanie Naprężenia (3D), czy też można ograniczyć się do Płaskiego Stanu Odkształcenia (2D). Przez proste warunki wodne należy rozumieć brak przepływów w kierunkach innych niż w płaszczyźnie przekroju.



Rys. 3. 1. Kryteria wyboru – przykład geometrii niezmiennej w kierunku prostopadłym do płaszczyzny przekroju (kolor zielony) i geometrii zmiennej (kolor niebieski)



Rys. 3. 2. Kryteria wyboru – złożona geologia



Rys. 3. 3. Kryteria wyboru – obliczenia w Płaskim Stanie Odkształcenia czy w Przestrzennym Stanie Naprężenia

W Załączniku 2 wskazano zalecenia odnośnie wyboru metod obliczeń stateczności w zależności od skomplikowania warunków gruntowych oraz obiektu geotechnicznego. Zestawienie najważniejszych wskazań wynikających z przepisów prawa omówiono w punkcie 2.2. W Załączniku 2 wskazano najczęściej stosowane metody oceny stateczności. W przypadku zastosowania innych metod niż wymienione w Załączniku 2 należy uzasadnić wybór.

4. Zalecenia dla analizy stateczności

4.1. Zalecenia ogólne

Dokumentacje wymagające oceny ogólnej stateczności

Ocena stateczności ogólnej sporządzana jest w ramach:

- **Opinii geotechnicznej** w przypadku obiektów budowlanych zaliczonych do pierwszej kategorii geotechnicznej. Ocena prowadzona jest na podstawie doświadczeń i jakościowych badań geotechnicznych. Do oceny ogólnej stateczności mogą być stosowane rozwiązania zamknięte (zgodnie z Załącznikiem 2).
- **Projektu geotechnicznego** dla obiektów zaliczonych do drugiej i trzeciej kategorii geotechnicznej (zgodnie z Załącznikiem 2).
- **Dokumentacji geologiczno-inżynierskiej** w przypadku obiektów budowlanych zaliczonych do trzeciej kategorii geotechnicznej oraz obiektów drugiej kategorii geotechnicznej posadowionych w warunkach złożonych.
- **Projektu budowlanego.** W przypadku zmiany warunków posadowienia, projektowania wzmocnień (itp.) należy przeprowadzić ponowne obliczenia z uwzględnieniem powstałych zmian. Również na tym etapie może powstać konieczność ponownego doboru obliczeniowych parametrów geotechnicznych, oddziaływań, metod obliczeniowych. W przypadku stosowania wzmocnień w ocenie stateczności należy uwzględnić ich właściwości odpowiednio do rozważanych sytuacji obliczeniowych krótkotrwałych/długotrwałych.

Tabela 4. 1. Dokumenty wymagające uwzględnienia stateczności ogólnej w odniesieniu do kategorii geotechnicznej obiektu budowlanego

Dokument	Ocena ogólnej stateczności		
	Kategoria I	Kategoria II	Kategoria III
Opinia geotechniczna (OG)	W	NW	NW
Projekt geotechniczny (PG)	ND	W	W
Dokumentacja geologiczno-inżynierska (DGI)	ND	Z	Z
Projekt budowlany (PB)	W	W	W

W – wymagany, Z – zalecany, ND – nie dotyczy, NW – nie jest wymagana.

Planowanie badań w celu oceny stateczności

W przypadku, gdy planowana jest ocena stateczności ogólnej należy to uwzględnić podczas projektowania oraz planowania badań polowych i laboratoryjnych. Plan badań powinien uwzględniać:

- Zakres badań polowych i laboratoryjnych dostosowany do warunków geologiczno-inżynierskich i geotechnicznych zgodnie z „Wytocznymi badań podłoża...” (2018) oraz z uwzględnieniem parametrów niezbędnych do oceny stateczności. Minimalny zakres parametrów wskazano w Załączniku 1.
- Lokalizację punktów badawczych umożliwiających opracowanie reprezentatywnego przekroju lub przekrojów geologiczno-inżynierskich przebiegających prostopadłe do powierzchni skarpy/zbocza, a w przypadku gdy nie można ustalić takich przekrojów należy rozważyć obliczenia 3D (ad 2, rys. 4.1).
- Określenie geotechnicznych parametrów charakterystycznych na podstawie wyprowadzonych parametrów geotechnicznych zgodnie z „Wytocznymi badań podłoża...” (2018, punkt 8.3).

Zalecenia do wykonywania obliczeń stateczności

W celu przeprowadzenia prawidłowej oceny warunków stateczności zaleca się (schemat na rysunku 4.1):

- Przeprowadzenie wizji lokalnej analizowanego terenu oraz studia dokumentacji archiwalnych, wyników badań polowych i laboratoryjnych oraz opracowanych dokumentacji.
- Określenie reprezentatywnego przekroju lub przekrojów geologiczno-inżynierskich przebiegających prostopadłe do powierzchni skarpy/zbocza, a w przypadku gdy nie można ustalić takich przekrojów należy rozważyć obliczenia 3D.
- Kompleksową ocenę warunków gruntowych pod kątem koniecznych do uwzględniania sytuacji obliczeniowych krótkotrwałych i długotrwałych. Określenie warunków analizy: czy analiza w warunkach z odpływem, czy/oraz z warunkami bez odpływu, a także określenie rozpatrywanego stanu naprężenia (czy analiza w naprężeniach całkowitych czy efektywnych).

Warunki z odpływem powinny być uwzględnione dla stanów granicznych dla warunków zawodnionych i są one adekwatne dla sytuacji obliczeniowych długotrwałych. Jeżeli deformacje w obrębie utworów drobnoziarnistych mogą się rozwijać w czasie, wówczas efektywna spójność będzie najprawdopodobniej stosunkowo niska i należy ostrożnie szacować wartość c_k' . Generalnie warunki bez odpływu powinny zostać uwzględnione dla projektowania skarp w utworach spoistych, dla których wymagana jest stateczność w warunkach krótkoterminowych, na przykład dla wykopów pod fundamenty wykonywanych w krótkim okresie czasu, czy też wznoszonych nasypów (również wykonywanych w krótkim okresie czasu). W sytuacjach tych adekwatne będzie uwzględnienie warunków bez odpływu i konieczne będzie rozważenie uwzględnienia takiego harmonogramu prac i zabezpieczeń, aby zapewnić bezpieczeństwo prac i stateczność konstrukcji.

- Określić parametry geotechniczne do analizy stateczności. Ocena stateczności jest zagadnieniem złożonym, dlatego też trudno określić jednoznaczne zestawienie

parametrów potrzebnych do analizy stateczności. W załączniku 1 przedstawiono zestawienie parametrów geotechnicznych istotnych dla przeprowadzenia oceny stateczności ogólnej. Ich ostateczny zakres należy określić w odniesieniu do występujących rodzajów gruntów i ich zachowania, zagadnień projektowych i konstrukcyjnych oraz wyodrębnionych stanów granicznych.

- W przypadku badań wykonywanych w terenie, gdzie występowały w przeszłości ruchy osuwiskowe lub na czynnych osuwiskach, tak dobrać lokalizację punktów badawczych, aby możliwie jak najlepiej określić położenie powierzchni poślizgu. Podczas pobierania rdzeni/próbek należy określić właściwie ich orientację w przestrzeni. W takich warunkach zalecane jest wykonanie oceny stateczności w ramach analizy odwrotnej.
- Dobór narzędzia (narzędzi) i metod obliczeniowych do przewidywanych mechanizmów zniszczeń oraz warunków geotechnicznych (Załącznik 2).
- Opracowanie modelu obliczeniowego uwzględniającego m.in.:
 - geometrię skarpy/zbocza,
 - budowę geologiczną oraz informacje o wcześniejszych lub trwających ruchach podłoża,
 - warunki wodne, w tym rozważenie najbardziej niekorzystnych warunków wodnych, a także sytuacji awarii odwadniania na skutek np. zniszczenia drenów,
 - dla rozważenia stanów granicznych użytkowości wykorzystanie mniej niekorzystnego, średniego poziomu wody lub ciśnienia wody w porach,
 - dla skarp wzdłuż linii brzegowej należy rozważyć wariant nagłego obniżenia poziomu wody powierzchniowej,
 - oddziaływania, obiekty i konstrukcje, których wpływ może być istotny z punktu widzenia stateczności.
- Ustalenie i analizę geotechnicznych parametrów charakterystycznych dla warstw geotechnicznych. W przypadku, gdy brak wymaganych danych należy wykonać uzupełniające badania polowe i laboratoryjne.
- Określenie współczynników częściowych oraz wyznaczenie obliczeniowych wartości oddziaływań, oporu, wytrzymałości.
- W przypadkach obiektów nietypowych, gdzie konsekwencje zniszczenia są wyjątkowo duże, bądź stosowania niekonwencjonalnych metod projektowania należy rozważyć zastosowanie podwyższonego zapasu bezpieczeństwa. Współczynniki częściowe określone w Eurokodzie 7 wprowadzają minimalny zapas bezpieczeństwa dla konwencjonalnych metod i typowych obiektów.
- Ocenę warunków stateczności przy uwzględnieniu, odpowiedniego dla analizowanego obiektu budowlanego, kryterium stateczności.
- W przypadku projektowania zabezpieczeń, zmiany warunków posadowienia, obliczenia stateczności powtórzyć przy uwzględnieniu projektowanych rozwiązań/powstałych zmian.
- Dla projektowanych wzmocnień wyznaczyć parametry obliczeniowe (np. dla geosyntetyków przy analizie sytuacji obliczeniowej długotrwałej należy uwzględnić wytrzymałość długoterminową) oraz rozważyć możliwe mechanizmy zniszczenia (np. poślizg na kontakcie geosyntetyk-grunt oraz przekroczenie wytrzymałości długoterminowej na rozciąganie, wyrwanie/zerwanie kotew gruntowych itp.).
- Ocenę współpracę projektowanego zbrojenia z gruntem (np. przedstawić siły osiowe w elementach zbrojenia).

W tabeli 4.2. przedstawiono poziomy ryzyka mogące wystąpić w poszczególnych kategoriach geotechnicznych oraz ogólny zakres wymagań dotyczących badań geotechnicznych.

Tabela 4. 2. Ryzyko oraz wymagania odnośnie badań geotechnicznych

Kategoria geotechniczna	Ryzyko	Wymagane badania geotechniczne
1	Pomijalnie małe	Wystarczające badania jakościowe, weryfikacja na podstawie lokalnych doświadczeń
2	Przeciętne (nie stwarzające szczególnego zagrożenia)	Zgodnie z PN-EN 1997-2
3	Wyższe niż przeciętne	Jak dla kategorii drugiej, przy czym może być potrzebne wykonanie dodatkowych i zaawansowanych badań

Na podstawie Bond et al. (2008)

Obliczenia stateczności dla warunków drogowych powinny zawierać:

- Określenie możliwych mechanizmów zniszczenia i warunków analiz stateczności.
- Obliczenia stateczności przy uwzględnieniu parametrów charakterystycznych. Określić należy globalną wartość wskaźnika stateczności. Dla warunków drogowych zaleca się, aby wyznaczony wskaźnik charakteryzował się zapasem bezpieczeństwa $FS > 1.5$. W przypadku obiektów nietypowych, niekonwencjonalnych metod projektowania, może zaistnieć konieczność zwiększenia zapasu bezpieczeństwa.
- Określenie współczynników częściowych zgodnie z wymogami PN-EN 1997-1.
- Obliczenia stateczności z uwzględnieniem wyznaczonych parametrów obliczeniowych i sprawdzenie spełnienia warunków PN-EN 1997-1.

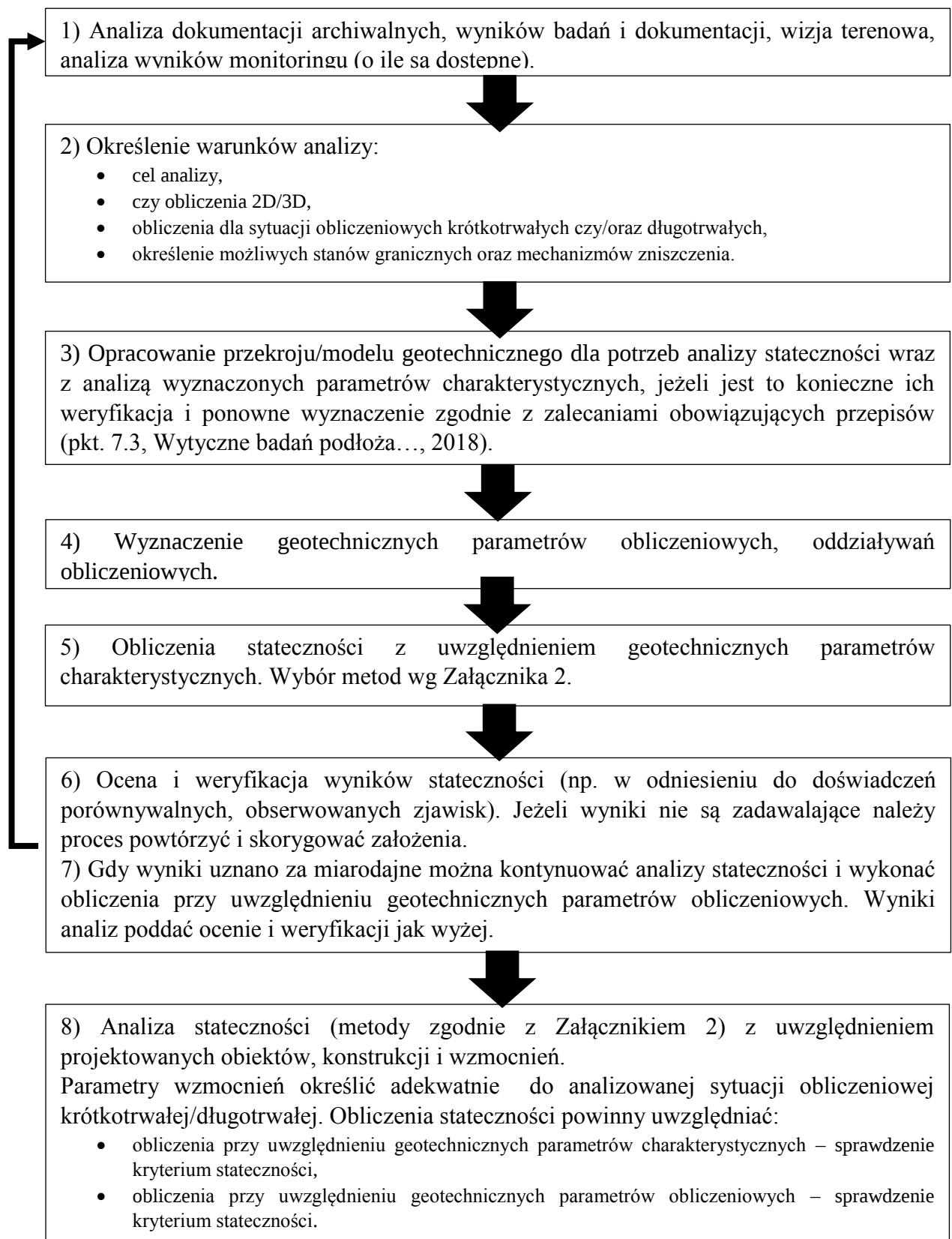
Ostateczną decyzję o wymaganej wartości wskaźnika stateczności lub wskaźnika wykorzystania nośności podejmuje wykonujący obliczenia stateczności lub projektant uwzględniając charakterystykę danego obiektu, metod projektowania i warunków geotechnicznych.

Dla warunków wymagających oceny stateczności, analizy powinny być opracowywane dla każdego przekroju wykonanego zgodnie z rozstawem wierceń określonym według „Wytucznych badań podłoża gruntowego (budowlanego) na potrzeby budownictwa drogowego (2018)”.

W przypadku osuwisk obliczenia powinny zostać wykonane dla przekroju/przekrojów geologiczno-inżynierskich zlokalizowanych w obrębie osuwiska oraz dla przekrojów konturujących (poza osuwiskiem).

Dla obiektów (np. konstrukcje oporowe, przepusty, mury oporowe) częstotliwość badanych przekrojów powinna być ustalana indywidualnie i dostosowana do warunków oraz złożoności obiektu.

Na rysunku 4.1. przedstawiono poszczególne etapy oceny stateczności ogólnej.



Rys. 4. 1. Schemat postępowania przy obliczeniach stateczności

4.2. Wybór metod analizy stateczności w odniesieniu do kategorii geotechnicznych

Zalecenia dla wyboru metod obliczeniowych zawarto w Załączniku nr 2. W przypadku zastosowania innych metod niż wymienione w Załączniku 2 należy uzasadnić wybór.

4.3. Kryteria oceny stateczności

W obliczeniach prowadzonych przy zastosowaniu parametrów charakterystycznych i wyznaczanym globalnym wskaźniku stateczności należy wykazać, że dla obiektów drogowych spełniony jest warunek $FS \geq 1.5$.

Dla obliczeń prowadzonych przy uwzględnieniu wymogów PN-EN 1997-1 należy wykazać, że przy uwzględnieniu odpowiednich współczynników częściowych spełniony jest warunek (1) lub (2). W przypadku obliczania globalnego wskaźnika stateczności przy uwzględnieniu wyznaczonych parametrów charakterystycznych na podstawie współczynników częściowych może zostać określony minimalny zapas bezpieczeństwa.

W przypadku, gdy w podejściu obliczeniowym 3 stosuje się „maksymalne parametry obliczeniowe tj. ustalone na podstawie doświadczeń lub obliczeń osuwisk w momencie utraty równowagi $F^2=1,0$. W takim przypadku parametry wytrzymałościowe oceniane są jako rzeczywiste w momencie wystąpienia stanu granicznego. Zapas bezpieczeństwa w stosunku do tego stanu będzie wystarczający, gdy po zabezpieczeniu wartość F będzie $F=1,3$ lub $F=1,5$ jak to się najczęściej przyjmuje” (Wysokiński, 2011).

4.4. Zalecenia dotyczące opracowań dokumentacji z analizy stateczności

Opracowanie zawierające ocenę stateczności powinno uwzględniać:

1. Informacje o zastosowanej metodzie obliczeń oraz narzędziu obliczeniowym.
2. Lokalizację przekrojów geotechnicznych oraz przekrojów geologiczno-inżynierskich dla których wykonano obliczenia stateczności.
3. Przekroje geologiczno-inżynierskie i przekroje geotechniczne będące podstawą opracowania modelu obliczeniowego.
4. Parametry charakterystyczne przyjęte do obliczeń stateczności, współczynniki częściowe do wyznaczenia parametrów obliczeniowych (projektowych), parametry obliczeniowe oraz inne założenia przyjęte do obliczeń i budowy modelu obliczeniowego.
5. Wytypowanie i uzasadnienie wybranych możliwych mechanizmów zniszczenia.
6. Modele obliczeniowe przygotowane do obliczeń stateczności wraz z przedstawieniem przebiegu warstw, warunkami brzegowymi, oddziaływaniami zewnętrznymi, warunkami wodnymi.
7. Uzyskane wyniki przedstawione w formie graficznej odwzorowujące zasięg powierzchni poślizgu wraz z określoną wartością wskaźnika stateczności.
8. Ocenę warunków stateczności i wnioski podsumowujące.

W załączniku 3 przedstawiono listę kontrolną dla weryfikacji zakresu wykonanej oceny stateczności ogólnej dla obiektów drugiej i trzeciej kategorii geotechnicznej.

² F – wskaźnik stateczności.

4.5. Zalecenia stosowania przestrzennych metod analizy stateczności w odniesieniu do złożoności warunków gruntowych

W pracach poświęconych analizie stateczności skarp w 3D dość rzadko można spotkać dokładne sformułowanie warunków brzegowych rozpatrywanego problemu. Wykładnię tego problemu przedstawiono w pracy Cały (2007). Stwierdzono, że najbardziej odpowiednimi warunkami brzegowymi dla obliczeń 3D powinny być:

- zerowe przemieszczenia w kierunku wszystkich osi na dolnej płaszczyźnie modelu,
- zerowe przemieszczenia tylko w kierunkach prostopadłych do odpowiednich płaszczyzn bocznych modelu.

Ich przyjęcie spowoduje, że utrata stateczności zbocza musi wystąpić z powodów naturalnych, w pewnym oddaleniu od krawędzi modelu. Jeżeli zidentyfikowana (np. za pomocą metody redukcji wytrzymałości na ścinanie) powierzchnia poślizgu przecina którąś z powierzchni brzegowych modelu (dolną lub boczne) to oznacza, że jego wymiary są zbyt małe i nie można uzyskać prawidłowej wartości FS. Podobnie nieprawidłowe jest przyjęcie zerowych przemieszczeń we wszystkich kierunkach na krawędziach bocznych modelu. Takie błędy można znaleźć w pracy Chugha i Starka (2003) i Jianga et al. (2003). Podobne praktyki stosują Griffiths i Marques (2007) usiłując wymusić zniszczenie jednorodnego zbocza. Rozpatrują oni połowę modelu (ze względu na symetrię) i boczną krawędź zewnętrzną utwierdzają, zaś na środkowej zakładają blokadę przemieszczeń prostopadłych, co skutkuje wymuszeniem utraty stateczności skarpy. Nie jest to postępowanie prawidłowe i tego rodzaju manipulacje warunkami brzegowymi nie mogą prowadzić do uzyskania prawidłowych wyników obliczeń. W bardzo delikatny sposób zwraca na to uwagę Vaughan (2008) w swoim komentarzu do pracy Griffithsa i Marquesa (2007). Pokazuje on przykład analizy stateczności niejednorodnej skarpy w 3D (przy prawidłowo przyjętych warunkach brzegowych) i różnice w porównaniu z wartościami FS otrzymanymi z analiz 2D. Wartości FS_{2D} wahają się od 1.0 do 2.5, zaś $FS_{3D}=1.52$, co wskazuje na wybitnie przestrzenny charakter zagadnienia.

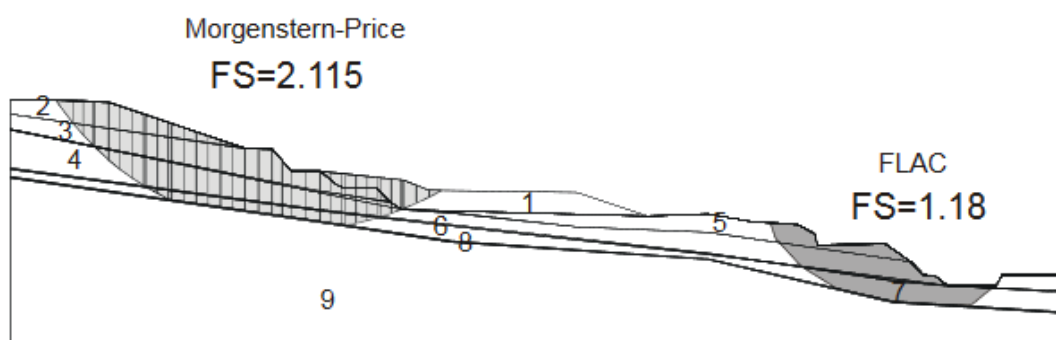
4.6. Zalecenia dla analizy stateczności dużych zboczy osuwiskowych

W przypadku oceny warunków stateczności dla zaistniałego osuwiska zalecane jest wyznaczenie parametrów na podstawie analizy odwrotnej. PN-EN 1997-1 (11.5.1.(8)) wskazuje, że w przypadku zboczy osuwiskowych, w których powtórnie mogą zostać uruchomione osuwiska, zazwyczaj wymagane są analizy wzdłuż walcowych, jak i niewalcowych powierzchni poślizgu. Wartości współczynników częściowych, zwykle stosowane do analizy stateczności ogólnej, mogą nie być w tym przypadku właściwe.

Analiza stateczności dla dużych zboczy, czy też terenów osuwiskowych, wskazuje na występowanie istotnych różnic w wynikach, w przypadku zastosowania metod równowagi granicznej i metod numerycznych (Stopkiewicz i Cała, 2004; Cała i Flisiak 2000). Dużo lepszą zgodność z obserwowanymi przejawami procesów osuwiskowych obserwuje się dla metod numerycznych.

Na istotne różnice wyników uzyskiwanych z metod równowagi granicznej i metod numerycznych wskazują także Cała i Flisiak (2000). Przedstawiając wyniki analiz stateczności dla zbocza o skomplikowanej budowie otrzymali znacząco różne wartości

wskaźnika stateczności dla metody Morgensterna-Price oraz metody redukcji wytrzymałości na ścinanie (program FLAC). Wyniki te przedstawiono na rysunku 4.2.



Rys. 4. 2. Zestawienie wyników analiz stateczności dla zbocza o skomplikowanej budowie otrzymanych za pomocą metody SSR i metody Morgensterna-Price (Cała, Flisiak, 2000)

W warunkach zboczy o skomplikowanej budowie geologicznej i złożonej geometrii metody równowagi granicznej mogą być stosowane na wstępnych etapach analiz. Dla pełnej analizy konieczne jest zastosowanie metod numerycznych.

4.7. Zalecenia dla obliczeń stateczności dla obiektów na terenach górniczych

W przypadku terenów poddanych oddziaływaniom podziemnej eksploatacji należy spodziewać się wpływu przemieszczania się frontu eksploatacyjnego na powierzchnię terenu. Postępująca eksploatacja powoduje rozwój i przemieszczanie się niecki osiadań. W tym przypadku nasyp lub wykop może się znaleźć w strefie oddziaływania wzmożonych naprężeń rozciągających lub ściskających oraz nierównomiernych osiadań. W takich przypadkach oddziaływania te powinny zostać włączone do analiz, poprzez odpowiednie dostosowanie modeli numerycznych. Podejście takie omówiono w przykładzie 4. Aktualnie dostępne narzędzia obliczeniowe pozwalają na prowadzenie tego typu analiz w warunkach 2D i 3D.

Podobnie należy postąpić w przypadku wykonywania obiektów, w miejscu planowanej eksploatacji podziemnej. Na podstawie prognoz deformacji terenu należy sprawdzić warunki stateczności obiektu.

4.8. Zalecenia dla analizy stateczności portali tuneli

W rejonach portali tuneli istotnym elementem jest ocena warunków stateczności skarp i zboczy. W tym celu należy przeprowadzić ocenę stateczności dla warunków przed wykonaniem obiektu oraz dla poszczególnych faz realizacji obiektu podziemnego. Do oceny stateczności skarp i zboczy w rejonie portali stosowane są metody równowagi granicznej (zalecane dla wstępnych etapów projektowania) oraz metody numeryczne. Dla portali tuneli zaleca się wykonywanie przede wszystkim obliczeń numerycznych, a także określenia przemieszczeń ośrodka. Analizy te pozwolą na korelację wyników obliczeń stateczności z

wynikami monitoringu. W przypadku znacznych różnic może się okazać, że konieczne będzie zweryfikowanie przyjętych założeń.

Przykłady zastosowań tych metod można znaleźć w pracy Kockara i Akguna (2003), którzy wykorzystali je dla kilku płaskich przekrojów zlokalizowanych w rejonie portali tuneli w Turcji. Satıcı i Unver (2015) przedstawili obliczenia stateczności portalu tunelu Kucukbelvar Highway Tunnel zlokalizowanego w północnowschodniej części Turcji drążonego w mocno spękanym masywie skalnym. Autorzy porównali wyniki obliczeń wykonane metodą elementów skończonych (Program Phase2 8.0 firmy Rocscience) dla parametrów ekwiwalentnych określonych dla masywu spękanego odwzorowanego jako ośrodek ciągły oraz przy uwzględnieniu tego samego zestawu danych z uwzględnieniem obecności systemu spękań. Stwierdzono, że odwzorowanie spękań poprzez zredukowanie właściwości masywu skalnego traktowanego jako ośrodek ciągły nie odwzorowuje właściwie zachowania się tego materiału. Dla miarodajnych analiz konieczne jest odwzorowanie systemu spękań występującego w ośrodku.

Ciekawym przykładem kompleksowej oceny stateczności portalu jest analiza stateczności zbocza portalu tunelu w Jawie Zachodniej, Indonezja (Budiman et al., 2015). W celu oceny warunków geotechnicznych projektowanego portalu tunelu przeprowadzono ocenę masywu skalnego wg klasyfikacji Bieniawskiego RMR, zastosowano także Slope Mass Rating (SMR). SMR opracowany przez Romano (1985) uwzględnia on ocenę stabilności masywu skalnego bazując na RMR_{basic} oraz orientacji nieciągłości. Przeprowadzono analizy kinematyczne w celu określenia prawdopodobnego mechanizmu zniszczenia (analiza potencjalnych mechanizmów zniszczenia uwzględniająca poślizg na płaskich, klinowych powierzchniach oraz powstanie zawalisk typu *toppling*) oraz obliczenia stateczności portalu (program metod równowagi granicznej Slide 5.0 – obliczenia przeprowadzono metodą Bishopa). Analizy przeprowadzono zarówno dla portalu południowego i północnego. Obliczenia były podstawą dla zaprojektowania geometrii zbocza w rejonie portalu.

W ostatnich latach, do analiz stateczności w rejonie portali tunelu coraz częściej wykorzystuje się przestrzenne obliczenia numeryczne. Pozwalają one na wykonanie złożonych analiz stateczności portalu oraz początkowego odcinka tunelu. Przykład takich analiz jest pokazany w pracach Lee (2009) oraz Genisa (2010). Wang et al. (2017) przedstawili analizę wpływu portalu tunelu Lan-Shan (Chiny) na stateczność zbocza (kąt nachylenia zbocza zmienia się od 20 – 45 stopni). Nadkład tunelu i zarazem zbocze budują w dużej mierze lessy oraz mułowce, sporadycznie ropy pylaste. Do oceny stateczności zbocza podczas wykonywania portalu opracowano model przestrzenny w programie MIDAS GTS. Program ten bazuje na metodzie elementów skończonych. Analizy koncentrowały się na określeniu deformacji i przemieszczeń skarp podczas wykonywania wejścia tunelu oraz wpływu drążenia tunelu na skarpe i portal tunelu. Wyniki analizy numerycznej porównywano z wynikami monitoringu uzyskując dobrą zbieżność wyników z modelowania z obserwacjami.

5. Zbiorcze zestawienie rekomendowanych metod analizy stateczności dla poszczególnych typów budowli

W załączniku 2 przedstawiono zbiorcze zestawienie zalecanych metod do obliczeń stateczności. W przypadku zastosowania innych metod niż wyszczególnione w Załączniku 2 należy uzasadnić wybór.

6. Literatura

- [1] Abramson L.W., Lee T.S., Sharama S., Boyce G.M., 1996: Slope stability and stabilization methods. Wiley, Canada
- [2] Arellano D., Stark T.D., 2000. Importance of three-dimensional slope stability analysis in practice. Slope Stability 2000, GSP nr 101 (ed. D.V. Griffiths et al.), Reston, VA: ASCE, s. 18-32.
- [3] Bond A. J., Schuppener B., Scarpelli G., Orr T. L.L.; Editors: Dimova S., Nikolova B., Pinto A. V.; Eurocode 7: Geotechnical Design Worked examples, http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/doc/2013_06_WS_GEO/report/2013_06_WS_GEO.pdf
- [4] Bond A. J., Harris, A. J., 2008. Decoding Eurocode 7, Taylor & Francis.
- [5] British Standards. Code of practice for earthworks BS6031:2009.
- [6] Budiman R. ., Pratama R., Musilm D., Sophian I., Design Analysis of Tunnel Portal in Pasir Jawa L.520 Pongkor's GMBU Underground Mine PT. Aneka Tambang Tbk. 10th Asian Regional Conference of IAEG (2015).
- [7] Cała M., 2007. Numeryczne metody analizy stateczności skarp. Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne AGH. Seria Rozprawy-Monografie. Nr 171.
- [8] Cała M., 2013. Analiza stateczności skarp i zboczy w 2D i 3D. Nowoczesne rozwiązania konstrukcyjno-materiałowo-technologiczne, geotechnika. XXVIII ogólnopolskie warsztaty pracy projektanta konstrukcji: T. 1, Wykłady. — Kraków. Polski Związek Inżynierów i Techników Budownictwa. Oddział Małopolski w Krakowie, s. 21–42.
- [9] Cała M., Flisiak J., 2000: Analiza stateczności skarp i zboczy w świetle obliczeń analitycznych i numerycznych, XXIII Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej, str. 27–37.
- [10] Cała M., Flisiak J., 2002: Analiza wpływu słabej warstwy na stateczność skarp, XXV Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej, str. 83–92.
- [11] Cała M., Cieślik J., Flisiak J., Kowalski M. 2006. Przyczyny awarii nasypu autostrady A-4 pomiędzy węzłami „Wirek” i „Batorego” w świetle obliczeń numerycznych. Geotechnika i budownictwo specjalne. XXIX ZSMGiG (pod red. D. Flisiak i m. Cała).
- [12] Cała M., Cieślik J., Flisiak J., Kowalski M. 2006. Analiza warunków stateczności nasypu autostrady A-4 między węzłami „Wirek” i „Batorego”. Geotechnika i budownictwo specjalne. XXIX ZSMGiG (pod red. D. Flisiak i m. Cała).
- [13] Cavounidis, S., 1987. On the ratio of factor of safety in slope stability analyses. Geotechnique. Vol. 37 (2), s. 207-210.
- [14] Chugh A.K., Stark T.D., 2003. An automated procedure for 3-dimensional grid generation. In Proceedings of the 3rd International FLAC Symposium, Sudbury, Ontario, 21–24 October 2003. A.A. Balkema, Lisse, The Netherlands, s. 9-15.
- [15] Genis M.: Assessment of the dynamic stability of the portals of the Dorukhan tunnel using numerical methods. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, pp. 1231-1241, Vol. 47, 2010.
- [16] Gens A., Hutchinson J., Cavounidis S., 1988. Three-dimensional analyses of slides in cohesive soils. Geotechnique. Vol. 38 (1), s. 1-23.

- [17] Griffiths D.V., Marquez R.M., 2007. Three-dimensional slope stability analysis by elasto-plastic finite elements. *Geotechnique*. Vol. 57, s. 537-546.
- [18] Jiang J.C., Baker R., Yamagami T., 2003. The effect of strength envelope nonlinearity on slope stability computations. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 40, s. 308-325.
- [19] Kockar M.K., Akgun H. . Methodology for tunnel and portal support design in mixed limestone, schist and phyllite conditions: a case study in Turkey. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, pp. 173-196, Vol. 40, 2003.
- [20] Kockar M.K., Akgun H.: Engineering geological investigations along the Iliku Tunnels Alanya, southern Turkey. *Engineering Geology*, pp. 141-158, Vol 68, 2003.
- [21] Kowalski M., 2014. Metodyka oceny warunków stateczności skarp o złożonej geometrii i budowie geologicznej. (Niepublikowana praca doktorska), Kraków, AGH
- [22] Lee J-S.: An application of three-dimensional analysis around a tunnel portal under construction. *Tunnelling and Underground Space Technology*, pp. 731-738, Vol. 24, 2009.
- [23] Mowen X., Zengfu W., Xiangyu L., Bo X., 2011. Three-dimensional critical slip surface locating and slope stability assesment for lava lobe of Unzen volcano. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* Vol. 3 (1), s. 82-89.
- [24] Orr T. L.L., Farrell E. R., 1999. *Geotechnical Design to Eurocode 7*. Springer
- [25] Satici O, Ünver B. Assessment of tunnel portal stability at jointed rock mass: A comparative case study. *Computers and Geotechnics* 64 (2015) 72–82.
- [26] Stopkowicz A., Cała M. 2004. Analiza stateczności zboczy zlokalizowanych we fliszu karpackim z zastosowaniem metod numerycznych. XXVII Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej.
- [27] Vaughan P.R., 2008. Discussion: Three-dimensional slope stability analysis by elasto-plastic finite elements by Griffiths D.V., Marquez R.M. *Geotechnique*. Vol.58, Nr 8, s. 683-685.
- [28] Wang J., Zeng Y., Xu Y. & Feng K. Analysis of the influence of tunnel portal section construction on slope stability *Geology, Ecology, and Landscapes*, 1:1, 56-65, DOI: 10.1080/24749508.2017.1301062

7. Załączniki

Załącznik 1. Minimalny zakres parametrów geotechnicznych do analizy stateczności/analizy przemieszczeń

Rozpoznanie warunków geotechnicznych, zakres badań polowych i laboratoryjnych powinien być zgodny z „Wytycznymi wykonywania badań podłoża gruntowego na potrzeby budownictwa drogowego. Część 1. Wytyczne badań podłoża budowlanego w drogownictwie. 2018. Praca zbiorowa” oraz z aktualnie obowiązującymi przepisami i normami.

W tabelach 7.1 i 7.2 przedstawiono minimalny zakres parametrów geotechnicznych niezbędnych do wykonania obliczeń stateczności ogólnej i/lub analizy przemieszczeń. **Ostateczny zakres parametrów geotechnicznych niezbędnych do uwzględnienia w analizie stateczności należy określić w odniesieniu do występujących rodzajów gruntów i ich zachowania, zagadnień projektowych i konstrukcyjnych oraz wyodrębnionych stanów granicznych.**

Tabela 7. 1. Minimalny zakres parametrów geotechnicznych do analizy stateczności/analizy przemieszczeń dla gruntów i skał

Parametr	Grunty		Skala/Masyw skalny
	Gruboziarniste	Drobnoziarniste	
<i>Parametry podstawowe</i>			
Wilgotność naturalna	W	W	W
Analiza sitowa	W	W	ND
Gęstość objętościowa	W	W	W
Granice Atterberga (granice konsystencji)	ND	W	ND
Stan gruntu ($I_D/ I_C/ I_L$)	W	W	ND
Parametry wytrzymałości na ścinanie bez odpływu*	W	W	ZO
Parametry wytrzymałości na ścinanie z odpływem*	W	W	ZO
Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie	ND	ND	W
Wytrzymałość na rozciąganie	ND	ND	W
Ocena jakości masywu skalnego (np.: RMR, Q)	ND	ND	W
Charakterystyka nieciągłości	ND	ND	W
Poziom zwierciadła wody gruntowej/ Minimalny i maksymalny poziom zwierciadła wody gruntowej	W	W	W
Współczynnik filtracji	Z	Z	Z
Ciśnienie porowe	Z	Z	Z
<i>Rozszerzenie parametrów podstawowych w przypadku analizy przemieszczeń</i>			
Moduł ściśliwości pierwotny i wtórny/Edometryczny moduł ściśliwości pierwotny i wtórny	W	W	ND
Moduł Younga/Moduł odkształcenia	W	W	W
Współczynnik Poissona/Współczynnik rozszerzalności bocznej	W	W	W
Wskaźnik porowatości	W	W	W
Oznaczenia: W – wymagane, Z – zalecane, ZO – zalecane z ograniczeniami (w zależności od potrzeb), ND – nie dotyczy			

* wybór parametru należy dostosować do warunków geotechnicznych.

Tabela 7. 2. Minimalny zakres parametrów geotechnicznych do analizy stateczności/analizy przemieszczeń dla gruntów antropogenicznych

Parametr	Zakres badań		
	Materiały pochodzenia naturalnego stosowane do wznoszenia nasypów (piaski, żwiry)	Uboczne produkty spalania (UPS)	Mieszanki stabilizowane hydraulicznie z uwzględnieniem UPS
Właściwości chemiczne*	ND	W	W
Długoterminowe parametry wytrzymałościowe	ND	W	W
Ciśnienie pęcznienia	ND	W	W
Długoterminowe badania ciśnienia pęcznienia	ND	W	W
Pozostałe parametry zgodnie z tabelą 7.1 w zależności od zakwalifikowania materiału.			
Oznaczenia: W – wymagane, Z – zalecane, ZO – zalecane z ograniczeniami (w zależności od potrzeb), NA-nie dotyczy			

* zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi, oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego (Dz.U. 2014 poz. 1800) badań długoterminowych właściwości mechanicznych, fizycznych i chemicznych.

Załącznik 2. Zalecane metody do oceny stateczności

Tabela 7. 3. Zalecane metody do oceny stateczności

Budowla	Kategoria geotechniczna	Rozwiązania zamknięte, przepisy, doświadczenie	Metody równowagi granicznej*		Metoda redukcji wytrzymałości na ścinanie		Inne metody - analiza klinów, bloków
			Powierzchnia kołowa (walcowa)	Inna niż kołowa (walcowa)	2D	3D	
Nasyp	I	Z	Z	Z	NW	NW	NA
	II	NZ	ZO	ZO	Z	NW	NA
	III	NA	NZ	ZO	Z	Z	NA
Wykop	I	Z	Z	Z	NW	NW	NA
	II	NZ	ZO	ZO	Z	NW	NA
	III	NA	NZ	ZO	Z	Z	NA
Podłoże	I	Z	Z	Z	NW	NW	NA
	II	NZ	ZO	ZO	Z	NW	NA
	III	NZ	NZ	ZO	Z	Z	NA
Zbocze (gruntowe, gruntowo-skalne)	I	ZO	Z	Z	Z	NW	NA
	II	NZ	ZO	ZO	Z	Z	NA
	III	NA	NZ	ZO	Z	Z	NA
Tereny osuwiskowe	III	NA	NZ	ZO	Z	Z	NA
Obszary objęte aktywnymi wpływami eksploatacji górniczej	III	NA	NZ	NZ	Z	Z	NA
Portale tuneli		NA	NZ	ZO	ZO	Z	NA
Ocena współpracy z elementami konstrukcji		NA	NZ	ZO	Z	Z	NA
Korelacja z wynikami z monitoringu przemieszczeń, obserwacja przemieszczeń		NA	NA	NA	Z	Z	NA
Zbocze skalne, masyw skalny - budowa blokowa		NZ	NZ	NZ	ZO	ZO	Z

Oznaczenia: Z – zalecane, ZO – zalecane z ograniczeniami, NA – nieadekwatne, NZ – niezalecane, NW – mogą być stosowane, choć nie ma potrzeby stosować takich rozwiązań

* W przypadku wyboru metody równowagi granicznej należy mieć na uwadze zalecenia PN-EN 1997-1 by analiza stateczności skarpy uwzględniała sprawdzenie całkowitego momentu i pionowej stateczności bryły odłamu. Jeżeli nie sprawdza się równowagi poziomej, siły pomiędzy paskami zaleca się przyjmować za poziome. Z tego względu niektóre metody równowagi granicznej nie spełniają powyższych wymagań

Załącznik 3. Lista kontrolna

Poniższa tabela uwzględnia elementy, które są wymagane lub zalecane w ocenie stateczności ogólnej dla obiektów drugiej i trzeciej kategorii geotechnicznej.

Tabela 7. 4. Lista kontrolna do oceny stateczności ogólnej

Elementy oceny stateczności ogólnej	Czy zgodne z wymaganiami			
	Tak	Nie	Wymaga uzupełnienia/korekty	Nie dotyczy
Strona tytułowa				
Cel analizy, lokalizacja obiektu				
Materiały źródłowe będące podstawą wykonania oceny stateczności				
Czy rozpoznanie (badania polowe/laboratoryjne) odpowiada kategorii obiektu budowlanego i zostało wykonane zgodnie z obowiązującymi przepisami?				
Dokumentacja fotograficzna/opisowa z wizji lokalnej				
Lokalizacja przekrojów będących podstawą opracowania modelu geotechnicznego				
Weryfikacja przebiegu opracowanego przekroju reprezentatywnego Czy przekroje zorientowane są prostopadle do powierzchni skarpy/zbocza? Czy model jest dostatecznie duży, aby nie zaburzyć wyników obliczeń?				
Określenie sytuacji obliczeniowych krótkotrwałych/długotrwałych koniecznych do uwzględnienia wraz ze wskazaniem rozważanych sposobów zniszczenia.				
Zestawienie geotechnicznych parametrów charakterystycznych. Sprawdzić, czy spełnione są wymagania minimalnego zakresu parametrów geotechnicznych (Załącznik 1).				

Elementy oceny stateczności ogólnej	Czy zgodne z wymaganiami			
	Tak	Nie	Wymaga uzupełnienia/korekty	Nie dotyczy
Uwaga: Wyznaczenie geotechnicznych parametrów charakterystycznych musi być wykonane odpowiednio do kategorii obiektu budowlanego (patrz 8.3, Wytyczne badań podłoża..., 2018) z uwzględnieniem wymagań PN EN 1997-1 i z uwzględnieniem zasady ostrożnego szacowania wartości wpływających na wystąpienie stanu granicznego.				
Określenie współczynników częściowych i wyznaczenie geotechnicznych parametrów obliczeniowych, oddziaływań. Gdy stosowane są inne niż zalecane przepisami wartości współczynników częściowych, wartości oddziaływań itp. – ich wybór powinien zostać uzasadniony.				
Wybór metod analizy stateczności (zgodnie z Załącznikiem 2) wraz z przedstawieniem krótkiej charakterystyki zastosowanej metody i narzędzia/narzędzi obliczeniowych.				
Określenie/wskazanie kryterium stateczności dla analizowanego obiektu budowlanego.				
Przedstawienie opracowanego modelu obliczeniowego wraz ze wskazaniem przebiegu warstw geotechnicznych, przyjętych wartości obliczeniowych parametrów geotechnicznych, oddziaływań, warunków brzegowych itp.				
Wyniki obliczeń stateczności dla geotechnicznych parametrów charakterystycznych uwzględniające przedstawienie przebiegu powierzchni poślizgu i wyznaczonej wartości wskaźnika stateczności.				
Ocena warunków stateczności i wnioski podsumowujące dla obliczeń z uwzględnieniem geotechnicznych parametrów charakterystycznych.				

Elementy oceny stateczności ogólnej	Czy zgodne z wymaganiami			
	Tak	Nie	Wymaga uzupełnienia/korekty	Nie dotyczy
Wyniki obliczeń stateczności dla geotechnicznych parametrów obliczeniowych uwzględniające przedstawienie przebiegu powierzchni poślizgu i wyznaczonej wartości wskaźnika stateczności.				
Ocena warunków stateczności i wnioski podsumowujące dla obliczeń z uwzględnieniem geotechnicznych parametrów obliczeniowych.				
Analiza z uwzględnieniem wzmocnienia ze wskazanie paramentów obliczeniowych, wskazanie rozważanych mechanizmów zniszczenia, analiza współpracy elementów wzmocnienia z ośrodkiem gruntowym/skalnym (np. analiza sił osiowych).				
Weryfikacja zakresu wykonanych obliczeń stateczności. Obliczenia powinny być wykonane dla każdego opracowanego przekroju zgodnie z rozstawem wierceń zalecanym w załączniku 7 Wytyczne badań podłoża... (2018). W przypadku osuwisk obliczenia co najmniej w jednym przekroju przebiegającym przez osuwisko i w dwóch przekrojach konturujących (poza osuwiskiem).				

Załącznik 4. Przykłady obliczeniowe

Poniżej zaprezentowano wybrane przykłady obliczeniowe. W przykładach 1-3 analizie poddano różne założenia, w tym obliczenia przeprowadzono z uwzględnieniem parametrów charakterystycznych oraz zgodnie z wymaganiami PN-EN 1997-1. Celem tych obliczeń było wskazanie różnic w wynikach końcowych. Przykład 4 przedstawia analizę dla warunków awarii nasypu drogowego na terenie objętym wpływami prowadzonej eksploatacji podziemnej.

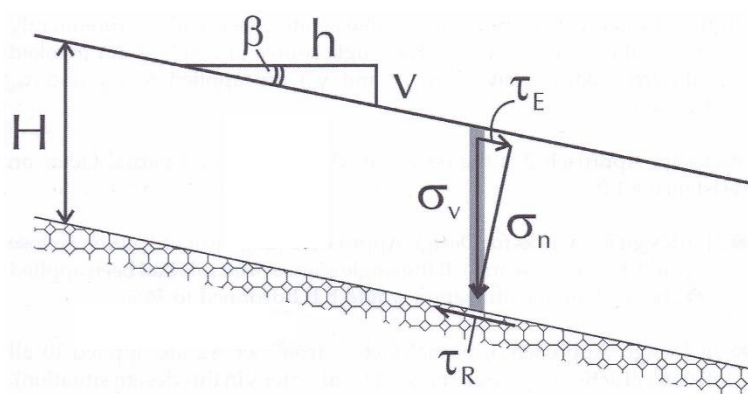
Przykład 1

Należy ocenić stateczność skarpy o nieograniczonej długości (rys. 7.1). W podłożu skarpy występują utwory skalne. Skarpa nie jest zawodniona. Miąższość utworów gruntowych wynosi $H=5\text{m}$.

Założenia:

	Oznaczenie	Wariant 1	Wariant 2
Nachylenie skarpy	β	18.4 (1:3)	33.7 (1:1.5)
Efektywny kąt tarcia wewnętrznego	φ_k	25	30
Efektywna spójność	c'_k	2	2
Ciężar objętościowy	γ_k	18	18

k – oznaczenie wartości charakterystycznych



Rys. 7. 1. Skarpa o nieograniczonej długości

Powierzchnia kontaktu na jednostkę szerokości i biegu skarpy:

$$A_n = \frac{1}{\cos(\beta)}$$

Naprężenia pionowe:

$$\sigma_{vk} = H \cdot \gamma_k$$

Naprężenia normalne do powierzchni poślizgu:

$$\sigma_{nk} = \frac{\sigma_{vk} \cdot \cos(\beta)}{A_n}$$

Naprężenia styczne do powierzchni poślizgu:

$$\tau_{Ek} = \frac{\sigma_{vk} \cdot \sin(\beta)}{A_n}$$

Opór ścinania:

- dla wartości charakterystycznych

$$\tau_{Rk} = c'_k + \sigma_{nk} \tan(\varphi_k)$$

- dla wartości projektowych

$$\tau_{Rd} = \frac{c'_d + \sigma_{nd} \tan(\varphi_d)}{\gamma_R}$$

Współczynniki częściowe dla podejścia DA3: A2+M2+R3

$$\gamma_G = 1.0$$

$\gamma_Q = 1.3$ – brak obciążenia w przykładzie

$$\gamma_\varphi = 1.25$$

$$\gamma_c = 1.25$$

$$\gamma_R = 1.0$$

Obliczenia dla wariantu 1:

Powierzchnia kontaktu na jednostkę szerokości i biegu skarpy:

$$A_n = \frac{1}{\cos(\beta)}$$

Naprężenia pionowe:

$$\sigma_{vk} = H \cdot \gamma_k = 5 \cdot 18 = 90 \text{ kPa}$$

Naprężenia normalne do powierzchni poślizgu:

$$\sigma_{nk} = \frac{\sigma_{vk} \cdot \cos(\beta)}{A_n} = 81 \text{ kPa}$$

Naprężenia styczne do powierzchni poślizgu:

$$\tau_{Ek} = \frac{\sigma_{vk} \cdot \sin(\beta)}{A_n} = 27kPa$$

Obliczeniowe naprężenia normalne: $\sigma_{nd} = \gamma_G \cdot \sigma_{nk} = 81kPa$

Obliczeniowe naprężenia styczne: $\tau_{Ed} = \gamma_G \cdot \tau_{Ek} = 27kPa$

Wartości obliczeniowa:

- efektywnego kąta tarcia:

$$\varphi_d = \tan^{-1} \frac{\tan(\varphi_k)}{\gamma_\varphi} = 20.5^\circ$$

- efektywnej spójności: $c'_d = \frac{c'_k}{\gamma_c} = 1.6 kPa$

Obliczeniowy opór ścinania:

$$\tau_{Rd} = \frac{c'_d + \sigma_{nd} \tan(\varphi_d)}{\gamma_R} = 31.8kPa$$

Sprawdzenie warunku:

$$\frac{R_d}{E_d} \geq 1, \text{ tj. czy } \frac{\tau_{Rd}}{\tau_{Ed}} = \frac{31.8}{27} = 1.18 \geq 1, \text{ zatem warunek jest spełniony.}$$

Wskaźnik wykorzystania nośności:

$$\Lambda_{GEO,3} = \frac{\tau_{Ed}}{\tau_{Rd}} = 85\% - \text{skarpa spełnia warunki.}$$

Obliczenia przeprowadzone przy uwzględnieniu parametrów charakterystycznych wskazują FS=1.47 (brak spełnienia wymogów FS<1,5).

Obliczenia dla wariantu 2:

Powierzchnia kontaktu na jednostkę szerokości i biegu skarpy:

$$A_n = \frac{1}{\cos(\beta)}$$

Naprężenia pionowe:

$$\sigma_{vk} = H \cdot \gamma_k = 5 \cdot 18 = 90kPa$$

Naprężenia normalne do powierzchni poślizgu:

$$\sigma_{nk} = \frac{\sigma_{vk} \cdot \cos(\beta)}{A_n} = 62.3kPa$$

Naprężenia styczne do powierzchni poślizgu:

$$\tau_{Ek} = \frac{\sigma_{vk} \cdot \sin(\beta)}{A_n} = 41.5kPa$$

Obliczeniowe naprężenia normalne: $\sigma_{nd} = \gamma_G \cdot \sigma_{nk} = 62.3 kPa$

Obliczeniowe naprężenia styczne: $\tau_{Ed} = \gamma_G \cdot \tau_{Ek} = 41.5 kPa$

Wartości obliczeniowe:

- efektywnego kąta tarcia: $\varphi_d = \tan^{-1} \frac{\tan(\varphi_k)}{\gamma_\varphi} = 24.8^\circ$

- efektywnej spójności: $c'_d = \frac{c'_k}{\gamma_c} = 1.6 kPa$

Obliczeniowy opór ścinania:

$$\tau_{Rd} = \frac{c'_d + \sigma_{nd} \tan(\varphi_d)}{\gamma_R} = 30.4 kPa$$

Sprawdzenie warunku:

$\frac{R_d}{E_d} \geq 1$ tj. czy $\frac{\tau_{Rd}}{\tau_{Ed}} = \frac{30.4}{41.5} = 0.73 < 1$ zatem warunek nie jest spełniony.

Opór wyczerpania nośności (wskaźnik wykorzystania nośności):

$A_{GEO,3} = \frac{\tau_{Ed}}{\tau_{Rd}} = 137\%$ - skarpa nie spełnia warunków.

Przy zastosowaniu obliczeń dla parametrów charakterystycznych wartość wskaźnika stateczności dla założeń wariantu 2 wynosi $FS=0.91$ (skarpa niestateczna) – wymogi nie są spełnione. Zalecane jest podjęcie działań mających na celu poprawę warunków stateczności.

Przykład 2

Rozważmy wykop o nachyleniu $\beta=24^\circ$. Wykop buduje 1,5 m warstwa piasków, poniżej zalegają piaski gliniaste. W wykopie przebiega droga. Obciążenie od ruchu kołowego przyjęto $q=25$ kPa.

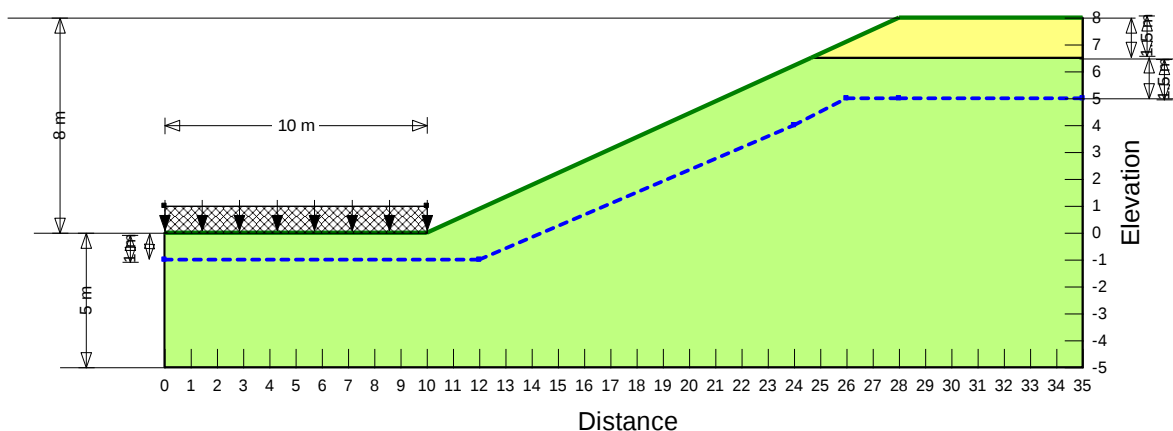
Obliczenia wykonano programem Slope/W z pakietu Geostudio (2018). Obliczenia stateczności przeprowadzono przy zastosowaniu metody Bishopa. Powierzchnie poślizgu definiowano metodą Entry-Exit. Założono podział potencjalnej bryły osuwiskowej na 30 pasków i podział odcinków Entry-Exit na 20. Obliczenia wykonano poprzez wprowadzenie do programu założonych parametrów geotechnicznych zestawionych w tabeli 7.4. Obliczenia wykonano dla geotechnicznych parametrów charakterystycznych oraz wg PN-EN 1997-1 przy założeniu podejścia obliczeniowego DA3.

Tabela 7. 5. Zestawienie przyjętych danych do obliczeń stateczności

	Efektywne parametry charakterystyczne		Parametry obliczeniowe DA3		
Właściwości	Piasek	Piasek gliniasty	Współczynniki	Piasek	Piasek gliniasty
Ciężar objętościowy γ [kN/m³]	18	20	1	18	20
Spójność c' [kPa]	0	5	1.25	0	4
Kąt tarcia wewn. ϕ [°]	35	23	1.25	29.25	18.76
Obciążenie q [kPa]	25		0*	0	
Wymagana wartość FS	>1.5		≥1.0		
Wyznaczona wartość FS	1.245 (rys. 7.3)		0.996 (rys. 7.5)		
Wskaźnik wykorzystania nośności [%]	120.5		100.4		
Komentarz	Warunek niespełniony		Warunek niespełniony		

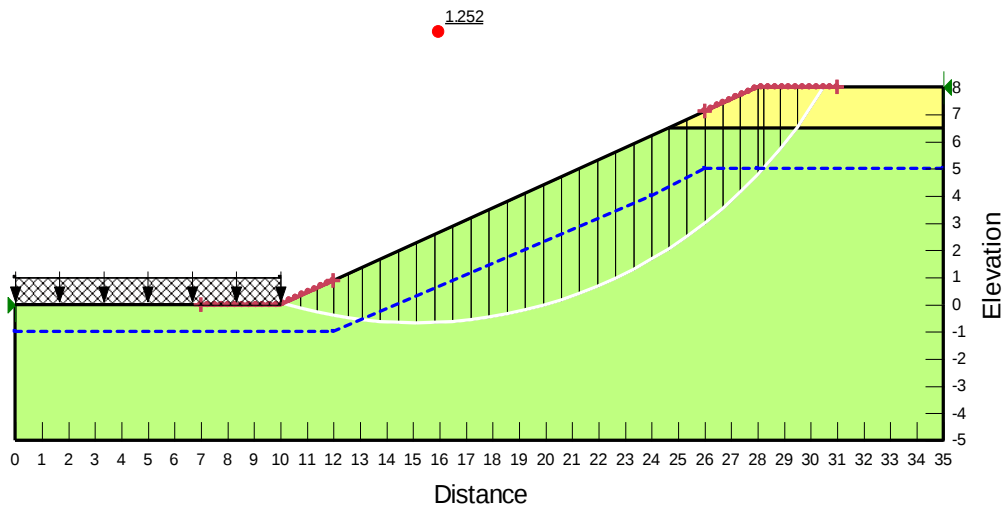
* sprawdzono wpływ dodanego obciążenia, w tym przypadku działa ono korzystnie stąd wartość $\gamma_G = 0$.

Geometrię analizowanej skarpy przedstawia rysunek 7.2.

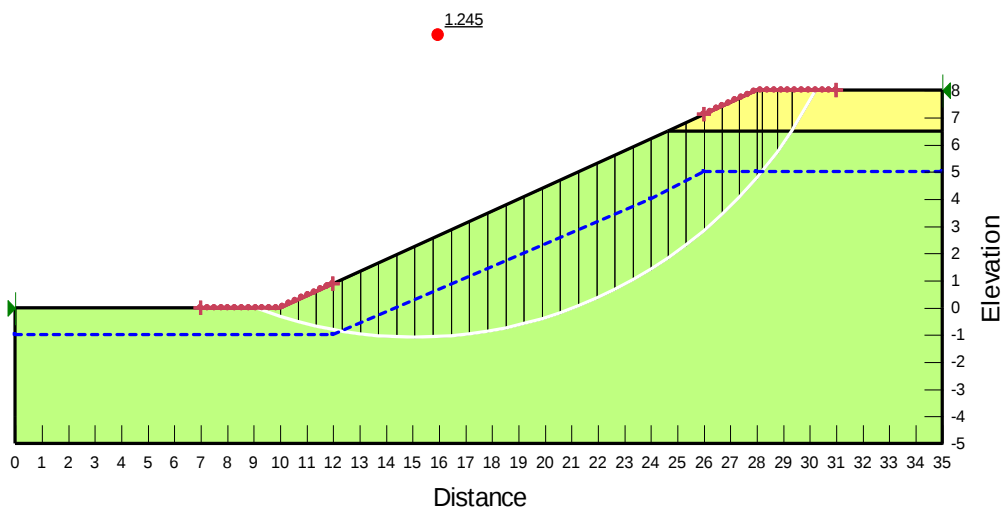


Rys. 7. 2. Geometria analizowanej skarpy

Color	Name	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)
	Piasek gliniasty	20	5	23
	Piaski	18	0	35

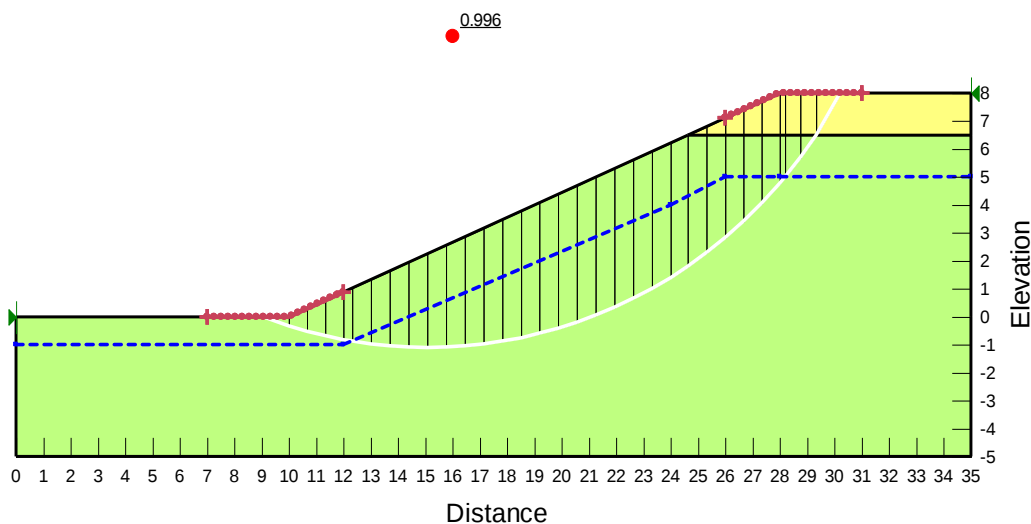


Color	Name	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)
	Piasek gliniasty	20	5	23
	Piaski	18	0	35



Rys. 7. 3. Zasięg powierzchni poślizgu dla wskaźnika stateczności FS=1.252 (1.245 bez obciążenia) wyznaczonego metodą Bishopa przy uwzględnieniu geotechnicznych parametrów charakterystycznych

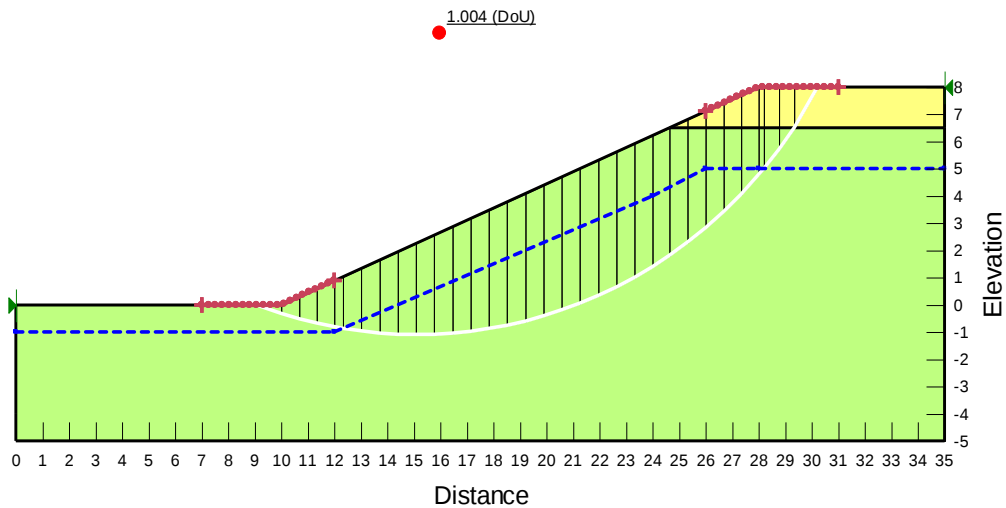
Color	Name	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)
	Piasek gliniasty	20	4	18.756
	Piaski	18	0	29.256



Rys. 7. 4. Zasięg powierzchni poślizgu dla wskaźnika stateczności FS=0.996 wyznaczonego metodą Bishopa przy uwzględnieniu geotechnicznych parametrów obliczeniowych określonych wg PN-EN 1997-1

Poniżej na rysunku 5.5 przedstawiono wyniki obliczeń przy zastosowaniu współczynników częściowych dla DA3 poprzez opcję implementowaną w programie Slope/W. Wyznaczona wartość wskaźnika wykorzystania nośności wynosi 100.4% (dla wskaźnika stateczności FS=0.996).

Color	Name	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)
	Piasek gliniasty	20	5	23
	Piaski	18	0	35



Rys. 7. 5. Zasięg powierzchni poślizgu dla wskaźnika wykorzystania nośności 100.4%. Obliczenia stateczności wykonano metodą Bishopa przy uwzględnieniu podejścia projektowego DA3 wg PN-EN 1997-1

Przykład 3

Rozważmy stateczność nasypu drogowego o wysokości 3.5 i pochyleniu skarp 1:2. Nasyp posadowiony jest na słabej warstwie o miąższości 2 m (gliny piaszczyste). Poniżej zalega warstwa piasków o miąższości 3 m, i warstwa glin. Model obliczeniowy przedstawiono na rysunku 7.6 oraz 7.11.

Charakterystyczne obciążenie od ruchu kołowego przyjęto o wartości 25 kPa.

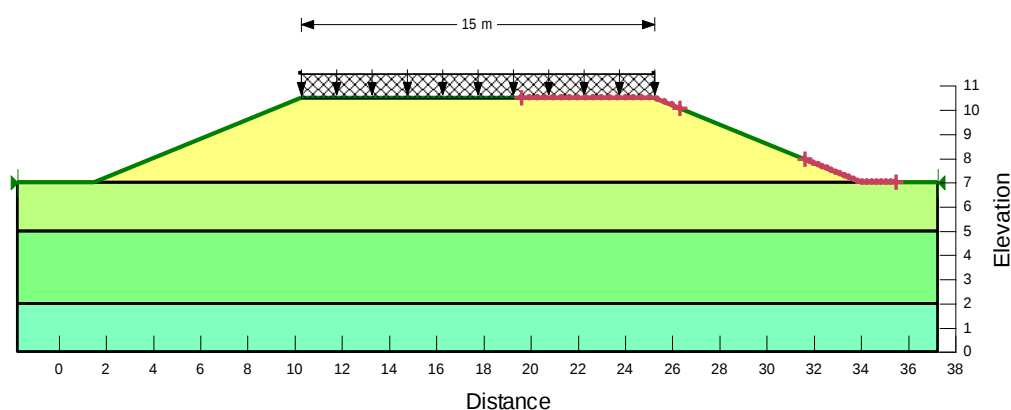
Obliczenia przy zastosowaniu metod równowagi granicznej

Obliczenia wstępne przy zastosowaniu metod równowagi granicznej (metoda Bishopa).

Tabela 7. 6. Zestawienie parametrów geotechnicznych przyjętych do obliczeń

Materiał	Parametry charakterystyczne			
	Ciężar objętościowy γ [kN/m ³]	Spójność c' [kPa]	Kąt tarcia wewn. ϕ [°]	Wytrzymałość bez odpływu c_u [kPa]
Nasyp	18	0	35	
Glina	17	0	27	16
Piasek luźny	19	0	32	
Glina piaszczysta	19	5	22	60
Współczynniki częściowe	1	1.25	1.25	1.4

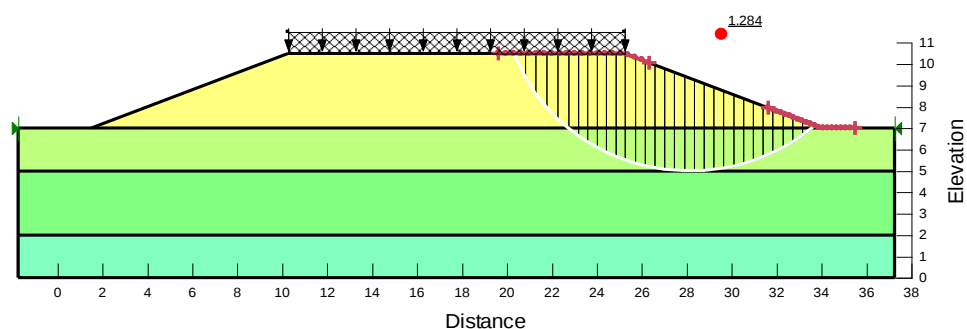
Color	Name	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)	Phi-B (°)	Cohesion (kPa)
	Gliny	19				60
	Gliny piaszczyste	17				16
	Nasyp	18	0	35	0	
	Piasek	19	0	32	0	



Rys. 7. 6. Model obliczeniowy z uwzględnieniem parametrów charakterystycznych dla warunków bez odpływu

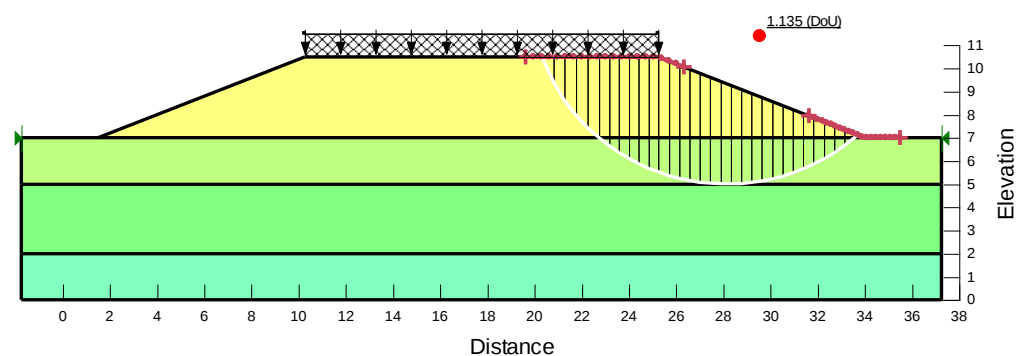
Obliczenia dla warunków krótkoterminowych (warunki bez odpływu)

Color	Name	Unit Weight (kN/m³)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)	Phi-B (°)	Cohesion (kPa)
	Gliny	19				60
	Gliny piaszczyste	17				16
	Nasyp	18	0	35	0	
	Piasek	19	0	32	0	



Rys. 7. 7. Zasięg powierzchni poślizgu dla wskaźnika stateczności FS=1.284 wyznaczonego metodą Bishopa przy uwzględnieniu geotechnicznych parametrów charakterystycznych dla warunków bez odpływu

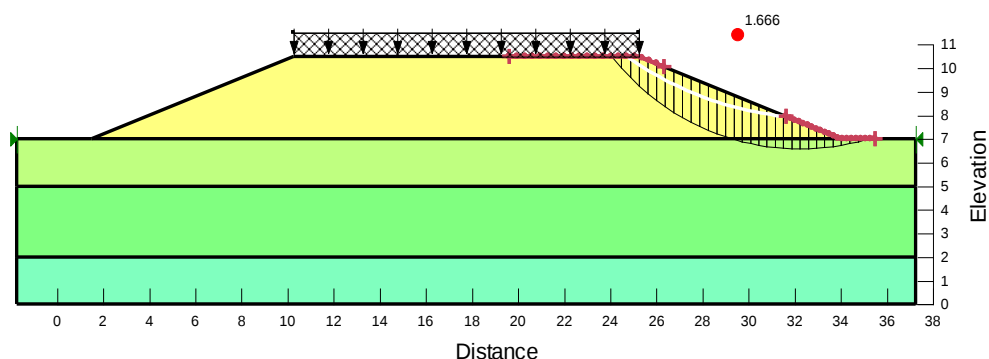
Color	Name	Unit Weight (kN/m³)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)	Phi-B (°)	Cohesion (kPa)
	Gliny	19				60
	Gliny piaszczyste	17				16
	Nasyp	18	0	35	0	
	Piasek	19	0	32	0	



Rys. 7. 8. Zasięg powierzchni poślizgu dla wskaźnika stateczności FS=0.881 wyznaczonego metodą Bishopa przy uwzględnieniu podejścia projektowego DA3 dla warunków bez odpływu. Wskaźnik wykorzystania nośności 113.5% (rozwiązanie nie spełnia wymogów).

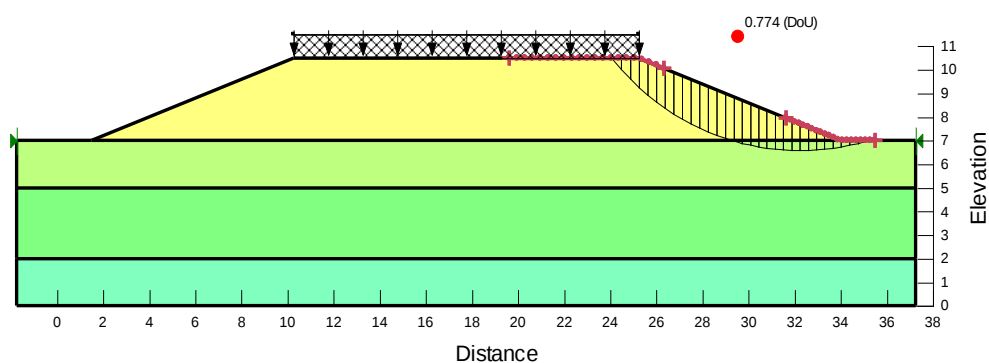
Obliczenia dla warunków długoterminowych (warunki z odpływem)

Color	Name	Unit Weight (kN/m³)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)
	Gliny	19	5	22
	Gliny piaszczyste	17	0	27
	Nasyp	18	0	35
	Piasek	19	0	32



Rys. 7. 9. Zasięg powierzchni poślizgu dla wskaźnika stateczności FS=1.666 wyznaczonego metodą Bishopa przy uwzględnieniu geotechnicznych parametrów charakterystycznych dla warunków z odpływem

Color	Name	Unit Weight (kN/m³)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)
	Gliny	19	5	22
	Gliny piaszczyste	17	0	27
	Nasyp	18	0	35
	Piasek	19	0	32



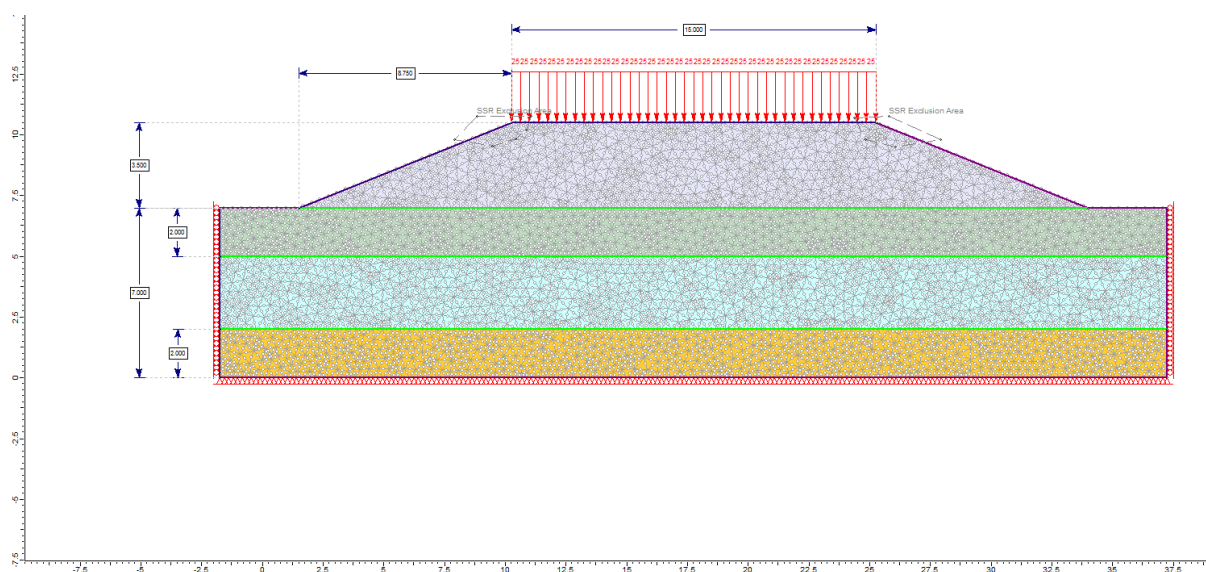
Rys. 7. 10. Zasięg powierzchni poślizgu dla wskaźnika stateczności FS=1.293 wyznaczonego metodą Bishopa przy uwzględnieniu podejścia projektowego DA3 dla warunków z odpływem. Wskaźnik wykorzystania nośności 77.4% (rozwiązanie spełnia wymogi).

Obliczenia stateczności metodą redukcji wytrzymałości na ścinanie

Do obliczeń stateczności przyjęto założenie, że wszystkie materiały charakteryzują się modułem Younga $E=100$ MPa; oraz współczynnikiem Poissona $\nu=0.3$. Parametry odkształceniowe nie wpływają na wartość wskaźnika stateczności, są natomiast kluczowe podczas analizy przemieszczeń (osiadań). Ze względu na zniszczenie występujące w rejonie górnej krawędzi skarpy – obszary te zostały wyłączone z obliczeń. W tabeli 7.6 przedstawiono wyniki obliczeń dla różnej liczby elementów przy uwzględnieniu charakterystycznych parametrów geotechnicznych. Do dalszych analiz przyjęto model z podziałem na 6 000 elementów.

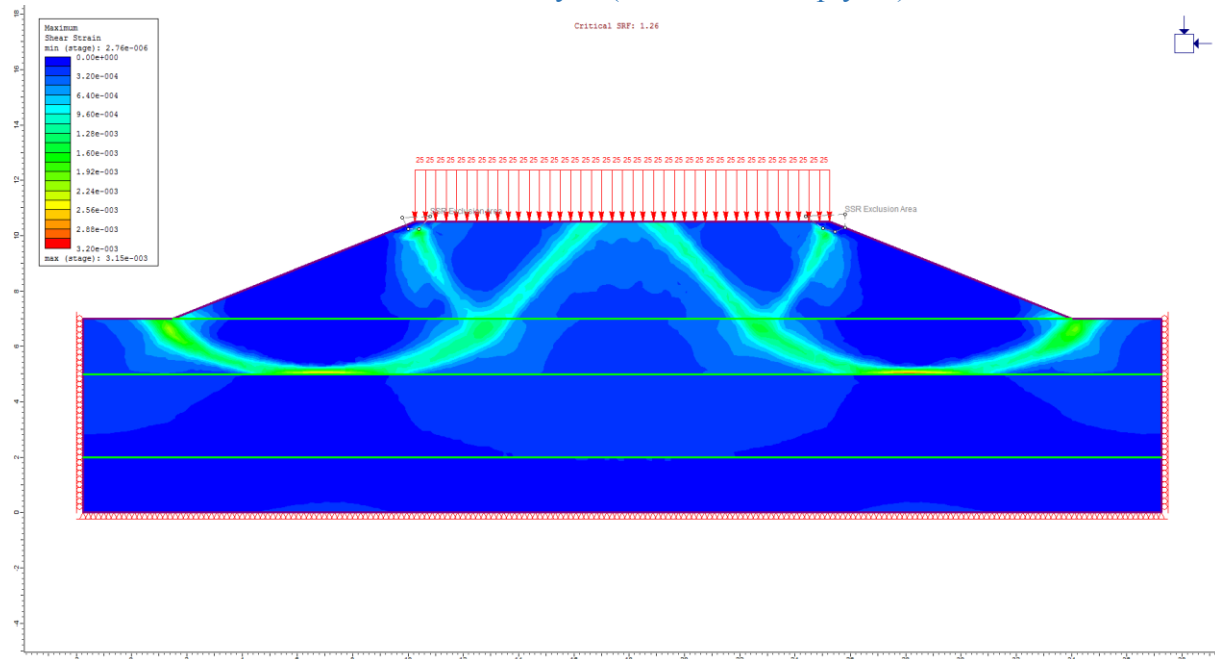
Tabela 7. 7. Wartość wskaźnika stateczności w zależności od uwzględnionej liczby elementów

Liczba elementów	Wskaźnik stateczności
2000	1.28
4000	1.26
6000	1.26
8000	1.26

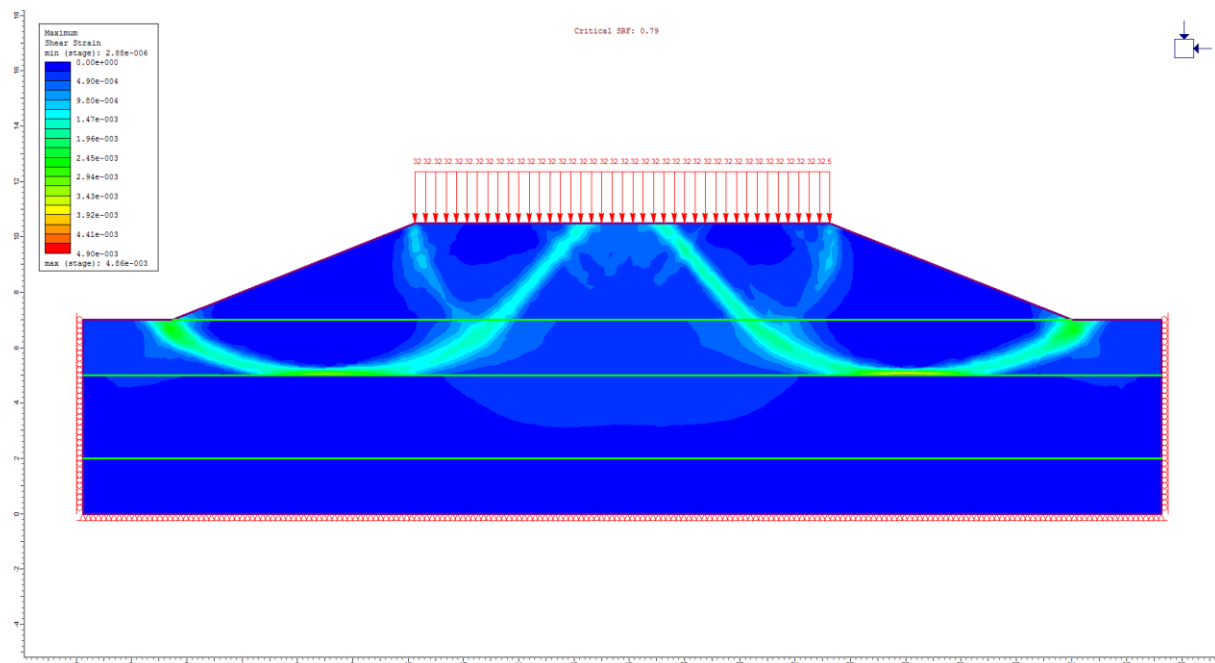


Rys. 7. 11. Model obliczeniowy

Obliczenia dla warunków krótkoterminowych (warunki bez odpływu)

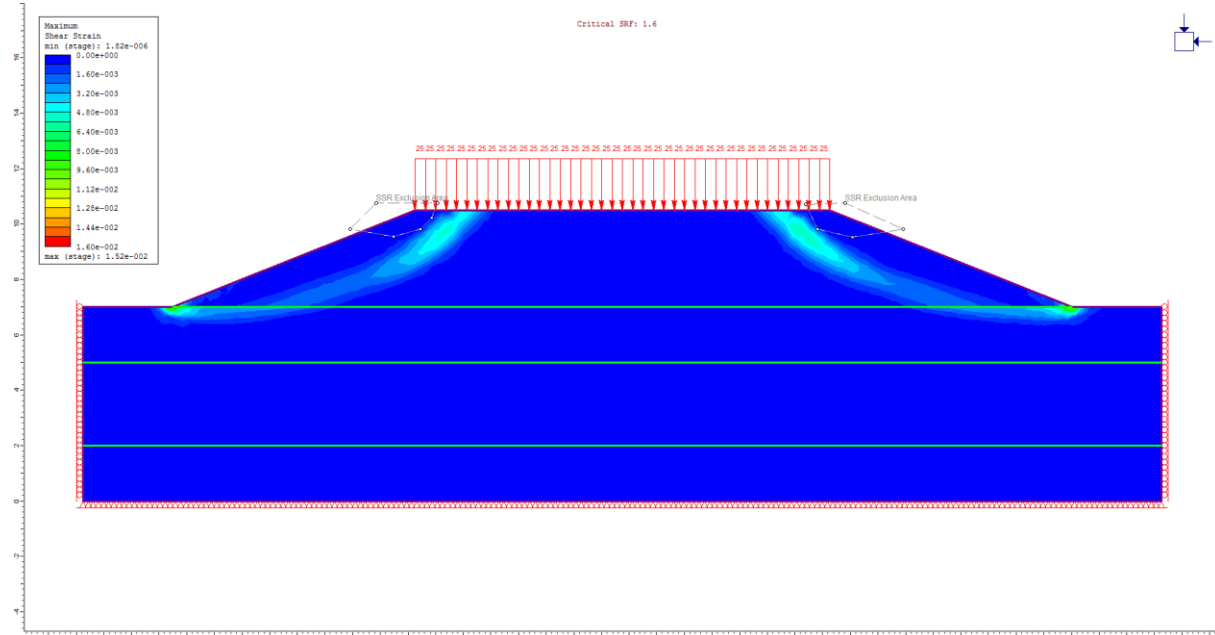


Rys. 7. 12. Zasięg powierzchni poślizgu przedstawiony na podstawie odkształceń postaciowych dla wskaźnika stateczności $FS=1.26$ wyznaczonego na podstawie metody redukcji wytrzymałości na ścinanie dla parametrów charakterystycznych

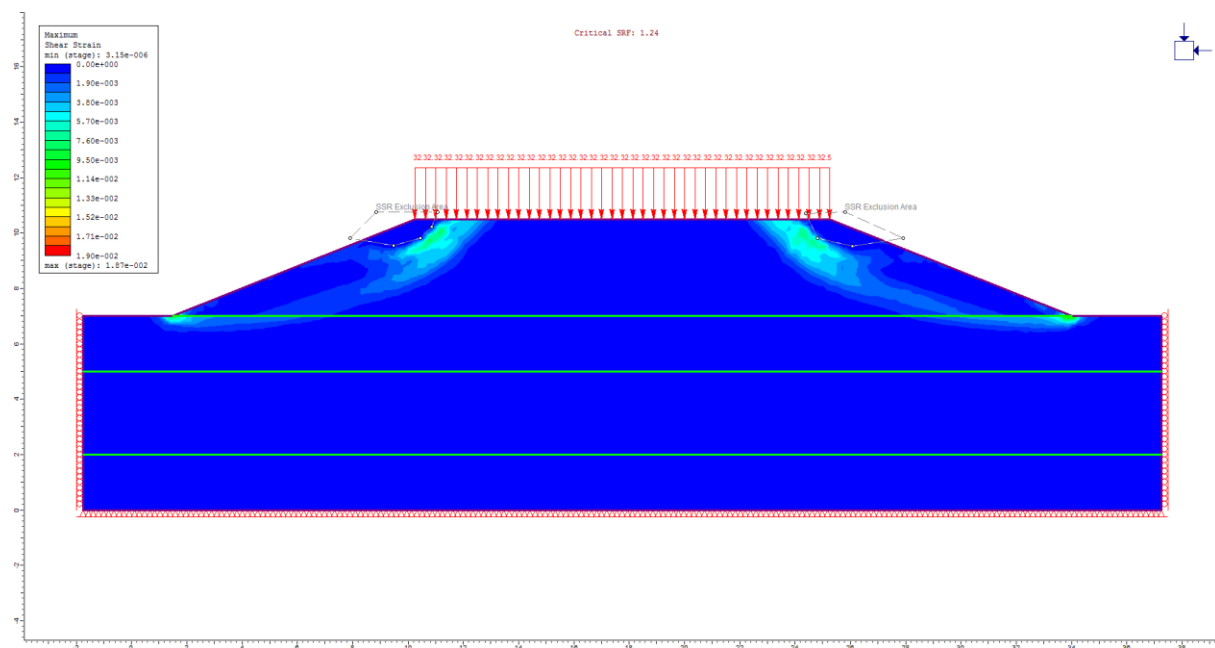


Rys. 7. 13. Zasięg powierzchni poślizgu przedstawiony na podstawie odkształceń postaciowych dla wskaźnika stateczności $FS=0.79$ wyznaczonego na podstawie metody redukcji wytrzymałości na ścinanie, podejście DA3

Obliczenia dla warunków długoterminowych (warunki z odpływem)



Rys. 7. 14. Zasięg powierzchni poślizgu przedstawiony na podstawie odkształceń postaciowych dla wskaźnika stateczności $FS=1.6$ wyznaczonego na podstawie metody redukcji wytrzymałości na ścinanie dla parametrów charakterystycznych



Rys. 7. 15. Zasięg powierzchni poślizgu przedstawiony na podstawie odkształceń postaciowych dla wskaźnika stateczności $FS=1.24$ wyznaczonego na podstawie metody redukcji wytrzymałości na ścinanie, podejście DA3

Zestawienie wyników

W tabeli 7.7 przedstawiono wyniki uzyskane dla nasypu drogowego zlokalizowanego na słabym podłożu. Na podstawie przeprowadzonych analiz należy stwierdzić, że w warunkach krótkoterminowych, przy uwzględnieniu warunków bez odpływu, analizowana skarpa nie spełnia warunków stateczności. Dotyczy to wszystkich analizowanych założeń. Natomiast w przypadku warunków długoterminowych we wszystkich przypadkach analiz wykonanych metodą Bishopa spełnione są wymogi warunków stateczności.

Tabela 7. 8. Zestawienie wyników

Założenia		Wyniki	Wymagania	Wskaźnik wykorzystania nośności [%]	Komentarz
Obliczenia wstępne przy uwzględnieniu metody Bishopa (metody równowagi granicznej)					
Warunki krótkoterminowe (bez odpływu)	Wartości charakterystyczne	1.284	$FS > 1.5$	117	Warunek niespełniony
	Podejście DA3	0.881	$FS \geq 1.0$	114	Warunek niespełniony
Warunki długoterminowe (z odpływem)	Wartości charakterystyczne	1.666	$FS > 1.5$	90	Warunek spełniony
	Podejście DA3	1.293	$FS \geq 1.0$	77	Warunek spełniony
Obliczenia przy uwzględnieniu metody redukcji wytrzymałości na ścinanie					
Warunki krótkoterminowe (bez odpływu)	Wartości charakterystyczne	1.25	$FS > 1.5$	120	Warunek niespełniony
	Podejście DA3	0.79	$FS \geq 1.0$	127	Warunek niespełniony
Warunki długoterminowe (z odpływem)	Wartości charakterystyczne	1.6	$FS > 1.5$	94	Warunek spełniony
	Podejście DA3	1.24	$FS \geq 1.0$	81	Warunek spełniony

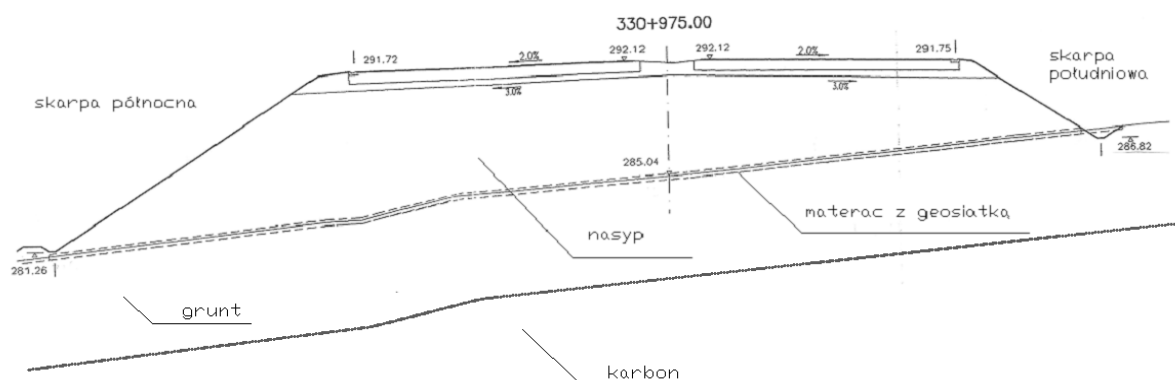
Obliczenia stateczności wykonane przy zastosowaniu metody redukcji wytrzymałości na ścinanie wykazują nieco niższe wartości wskaźników stateczności. Podobnie jak przy zastosowaniu metody równowagi granicznej, w warunkach bez odpływu we wszystkich analizowanych przypadkach stwierdzono brak spełnionych wymagań.

Dla pełnej analizy obliczenia te powinny zostać uzupełnione o analizy osiadania w celu sprawdzenia, czy nie zostają przekroczone dopuszczalne wartości.

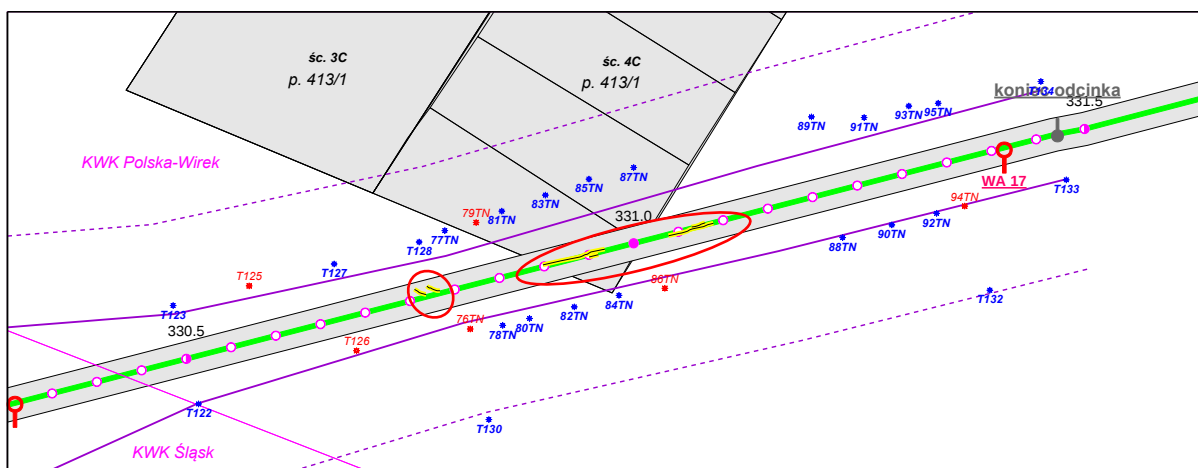
Przykład 4

W przykładzie 4 przedstawiono przestrzenną analizę wybranego zagadnienia geotechnicznego w skomplikowanych warunkach gruntowych. Celem obliczeń było określenie i wyjaśnienie możliwości powstania spękań i szczelin pionowych w koronie nasypu autostrady A-4 na odcinku od km 330+700 do 331+200, znajdującym się pomiędzy węzłami „Wirek” — „Batorego” na terenie Rudy Śląskiej. Na odcinku tym autostrada zlokalizowana jest na wysokim nasypie (rys. 7.16), uformowanym na podłożu o nachyleniu około 10% w kierunku północno-zachodnim, zgodnym z normalną do osi autostrady. Wysokość nasypu w rejonie awarii przekraczała 10 m (przy skarpie północnej), a nachylenie skarp, zarówno północnej jak i południowej, było zbliżone do 1:1.5 (ok. 34°). W rejonie awarii występowały skomplikowane warunki gruntowe, a budowla zaliczona została do III kategorii geotechnicznej. Nasyp wykonany był głównie z gruntów urobionych przy wykonywaniu wykopów z nim sąsiadujących.

Nasyp przedmiotowego odcinka autostrady znajdował się bezpośrednio ponad krawędzią ściany 4C, której eksploatacja odbywała się już po wykonaniu nasypu (rys. 7.17). We wrześniu 2004 r. stwierdzono stan awaryjny nasypu autostrady na odcinku w rejonie km 330.900 skutkujący m. in. powstaniem spękań o rozwarości do kilku cm oraz głębokości do dwóch metrów (rys. 7.17 i 5.18).



Rys. 7. 16. Przekrój przez analizowany nasyp



Rys. 7. 17. Położenie krawędzi ścian 3C i 4C w stosunku do analizowanego odcinka autostrady A-4 oraz zaznaczone miejsca uszkodzeń nasypu (czerwone elipsy)



Rys. 7. 18. Uszkodzenia w koronie nasypu oraz nawierzchni autostrady

Założenia do obliczeń

Wykonane dotychczas analizy deformacji i stateczności przedmiotowego nasypu przeprowadzone były w płaskim stanie odkształcenia (model dwuwymiarowy). Na podstawie tych analiz udało się odwzorować warunki w których doszło do uszkodzenia nasypu, jak również stwierdzić przyczyny tych uszkodzeń. Nie można było jednak na tej podstawie wnioskować m.in. o zasięgu powstałych uszkodzeń. W niniejszym rozdziale przedstawiono więc analizę przestrzenną fragmentu nasypu o długości 1 kilometra. Do obliczeń przyjęto parametry podłoża i nasypu wynikające z założeń projektowych. Przyjęto, że materac zbudowany jest z żużla wielkopieczowego, nasyp z mieszaniny okruszków piaskowca, piasku oraz gliny, a w podłożu zalegają utwory gliny pylastej twardoplastycznej, poniżej których zlokalizowane są skalne utwory karbonu. Parametry fizyko-mechaniczne poszczególnych warstw przyjęte w obliczeniach zestawiono w tabeli 7.8.

Tabela 7. 9. Parametry fizyko-mechaniczne warstw przyjęte w obliczeniach

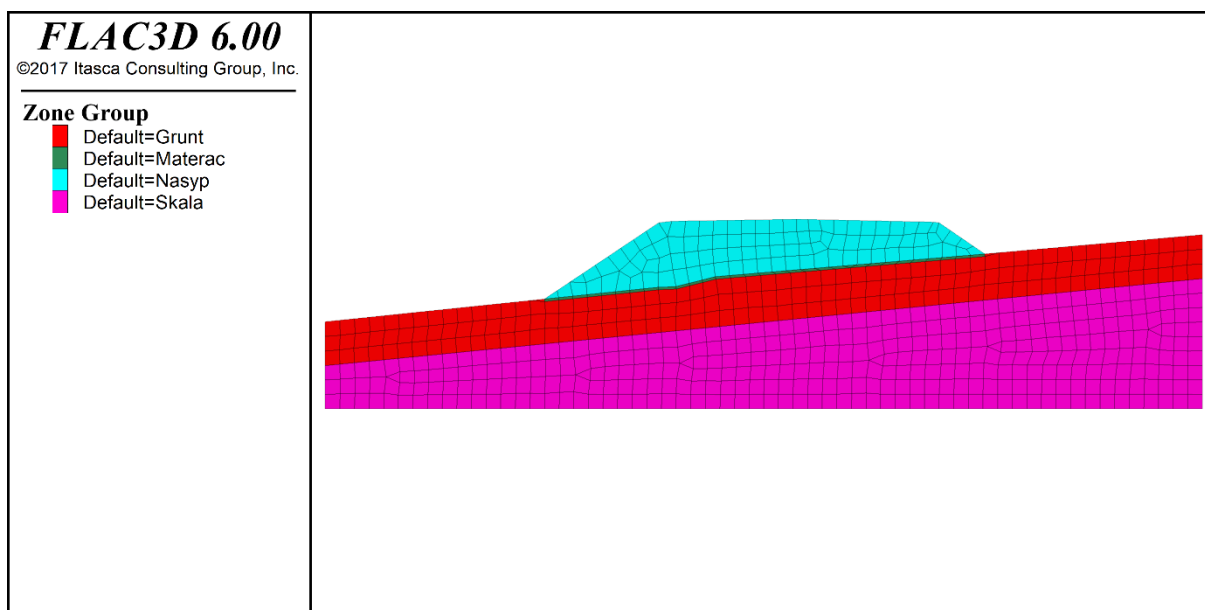
Warstwa	Ciężar objętościowy γ [kN/m ³]	Moduł Younga E [MPa]	Współczynnik Poissona ν [-]	Kohezja c [kPa]	Kąt tarcia wewnętrzny φ [°]
Nasyp	20.0	60	0.25	18.0	25.0
Materac	16.0	60	0.25	60.79	45.8
Grunty	20.7	30	0.25	15.0	14.0
Skala	25.0	5000	0.30	1000	35.0

Do obliczeń przyjęto model przedstawiony na rysunkach 5.19 i 5.20, o szerokości podstawy równej 120 m, wysokości podłoża z lewej strony 11.9 m, z prawej strony 23.8 m i długości nasypu równej 1000 m. Wysokość skarpy północnej (lewa strona modelu) wynosi 10.4 m, a skarpy południowej (strona prawa) 4.3 m. W podłożu poniżej głębokości 6 m znajduje się warstwa skał karbońskich.

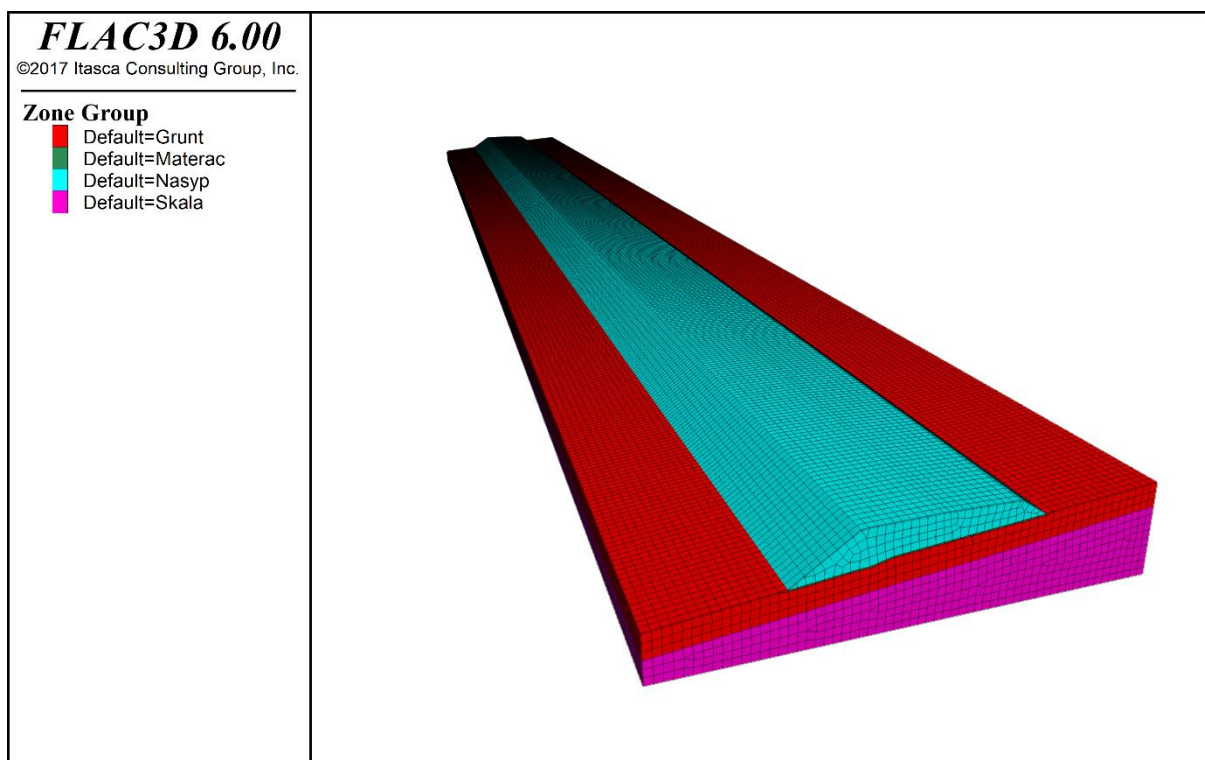
Tak przygotowany model numeryczny rozwiązano uzyskując stan równowagi (stan pierwotny po wykonaniu nasypu, a przed eksploatacją ścian 4C). Na rysunku 5.21 przedstawiono mapę naprężeń pionowych, natomiast rysunek 5.22 przedstawia mapę naprężeń poziomych.

Aby przeprowadzić analizę wpływu deformacji górniczych na nasyp niezbędne jest przyjęcie w modelu numerycznym odpowiednich warunków brzegowych. W tym celu przeprowadzono obliczenia wg teorii Budryka-Knothego uzyskując mapy osiadań, nachyleń, odkształceń i przemieszczeń poziomych. Przykładową mapę dla nachyleń całkowitych przedstawiono na rysunku 5.23.

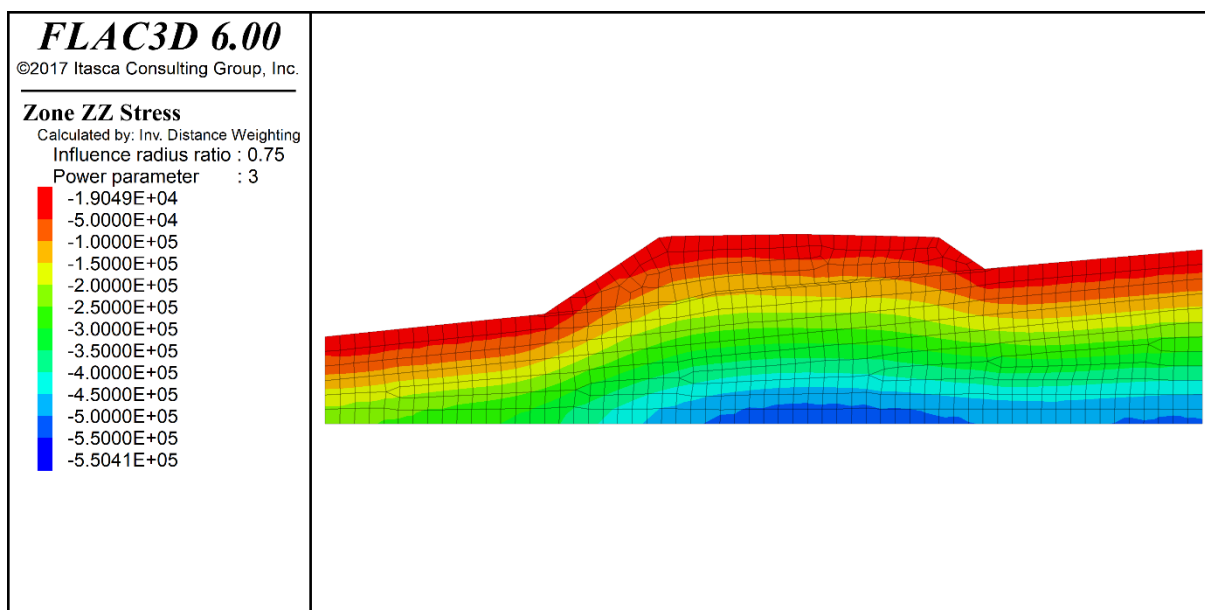
W kolejnym etapie – wykorzystując wbudowany w program FLAC3D wewnętrzny język programowania FISH – napisano procedurę która na podstawie map deformacji powierzchni (mapa osiadań i mapa przemieszczeń poziomych) uzyskanych z hipotezy Budryka-Knothego, zakłada w węzłach modelu numerycznego jako warunki brzegowe odpowiednie wartości prędkości na krok obliczeniowy (rys. 7.24 i 5.25). Po wykonaniu określonej liczby kroków uzyskuje się w efekcie sytuację, w której model nasypu poddawany jest deformacjom odwzorowującym eksploatację na terenie górniczym.



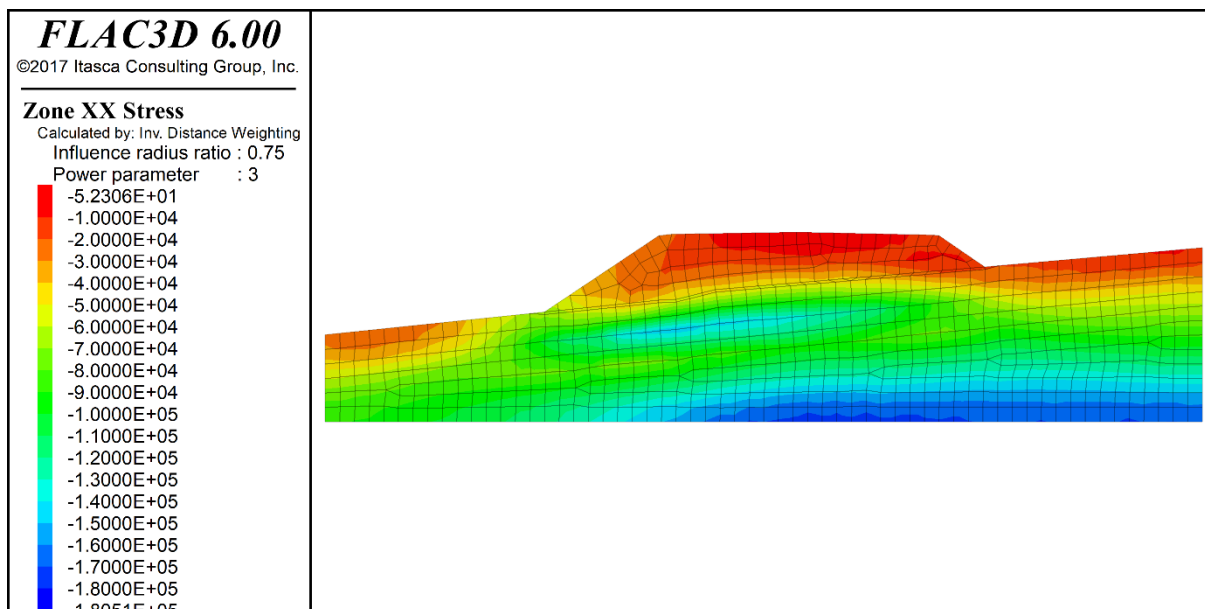
Rys. 7. 19. Przekrój przez model nasypu przyjęty do obliczeń



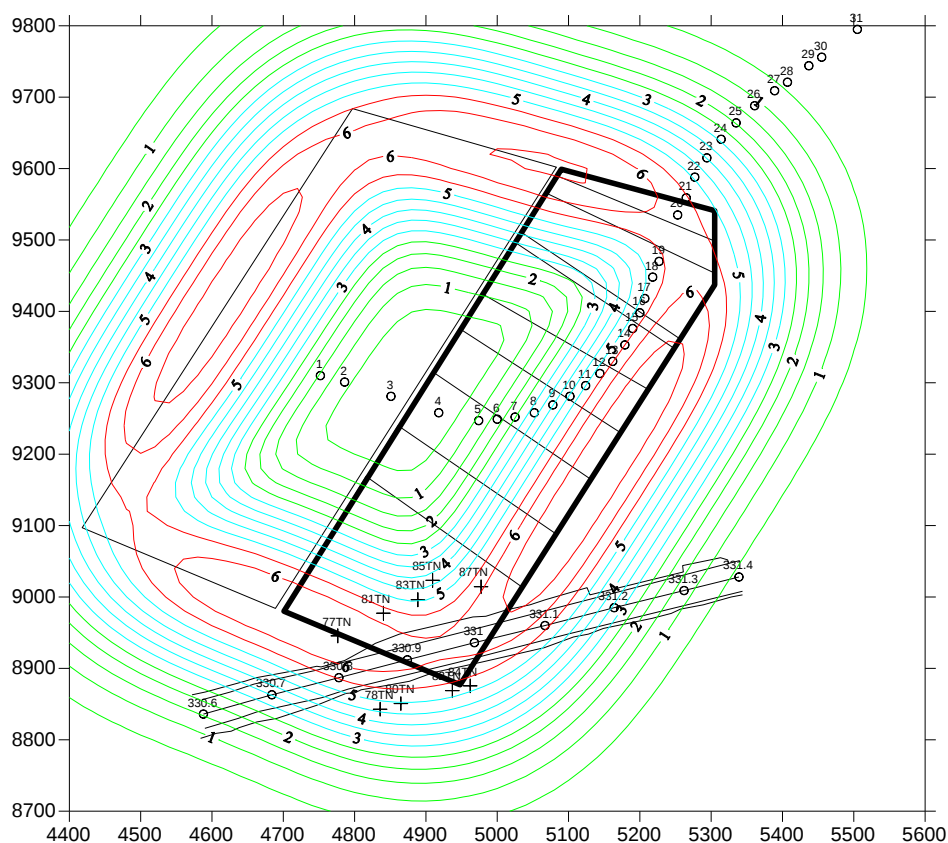
Rys. 7. 20. Model nasypu przyjęty do obliczeń



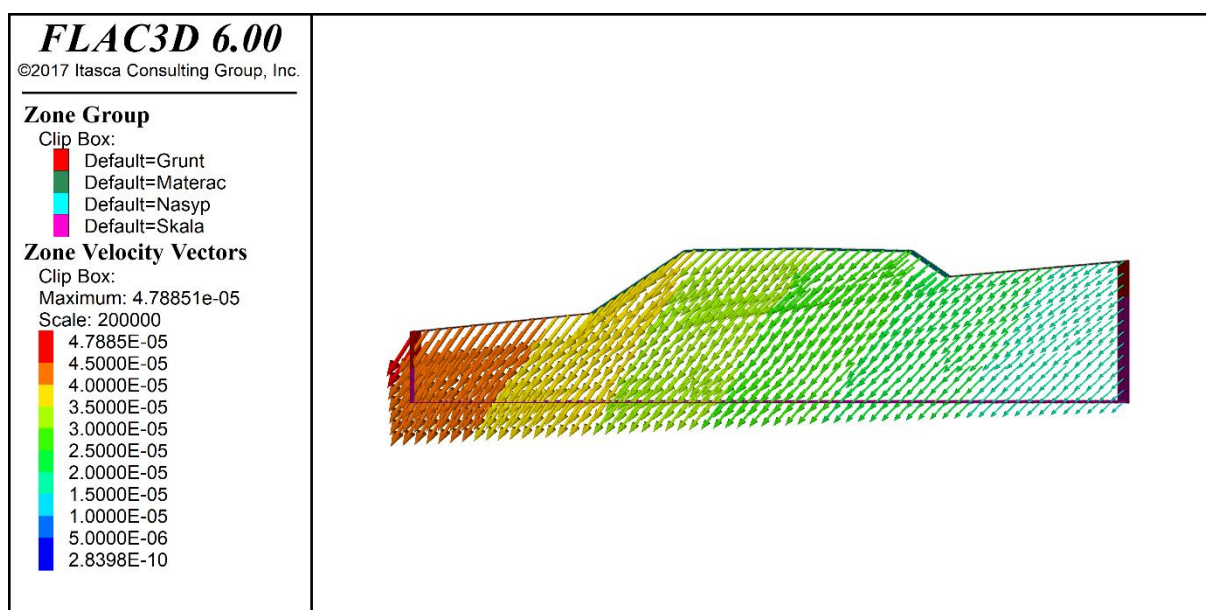
Rys. 7. 21. Mapa naprężeń pionowych w nasypie przed eksploatacją ściany 4C



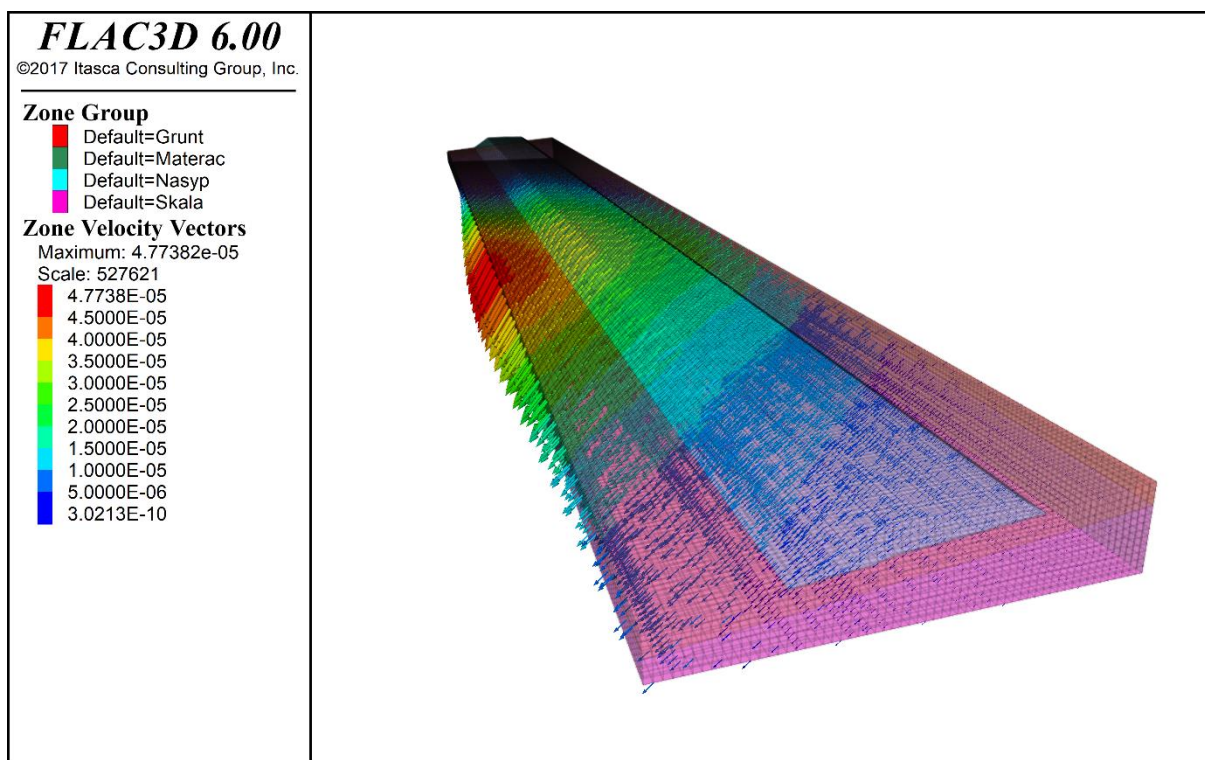
Rys. 7. 22. Mapa naprężeń poziomych w nasypie przed eksploatacją ściany 4C



Rys. 7. 23. Wyniki obliczeń nachyleń całkowitych współczynnika eksploatacji $a=0.9$



Rys. 7. 24. Warunki brzegowe i początkowe przyjęte w postaci wektorów prędkości (w przekroju)



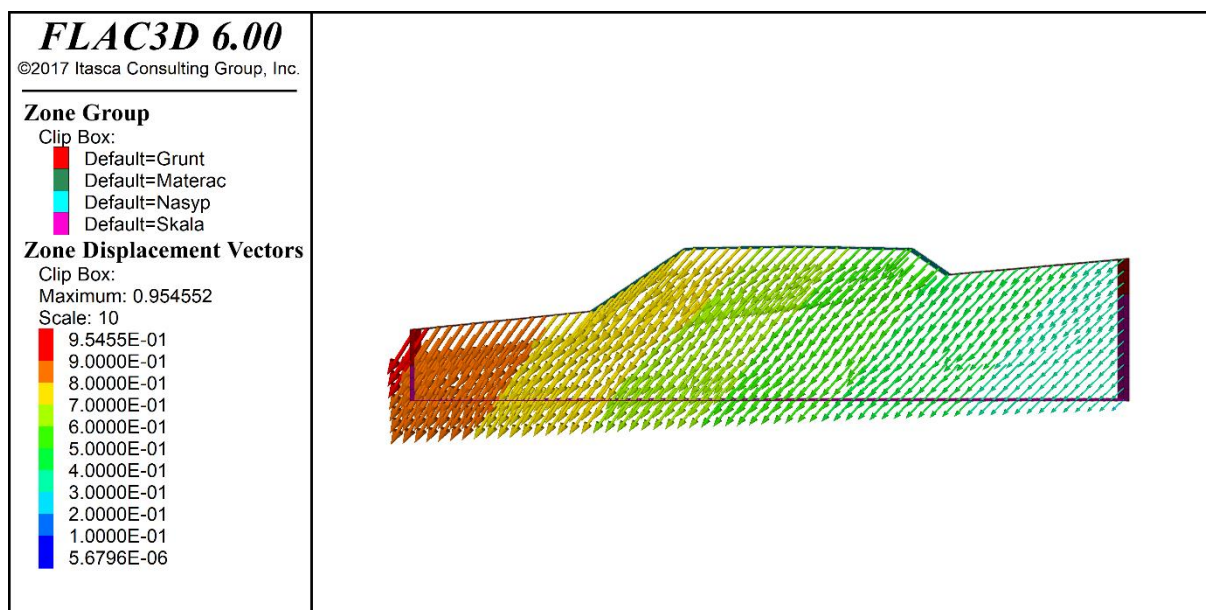
Rys. 7. 25. Warunki brzegowe i początkowe przyjęte w postaci wektorów prędkości (widok ogólny)

Wyniki obliczeń

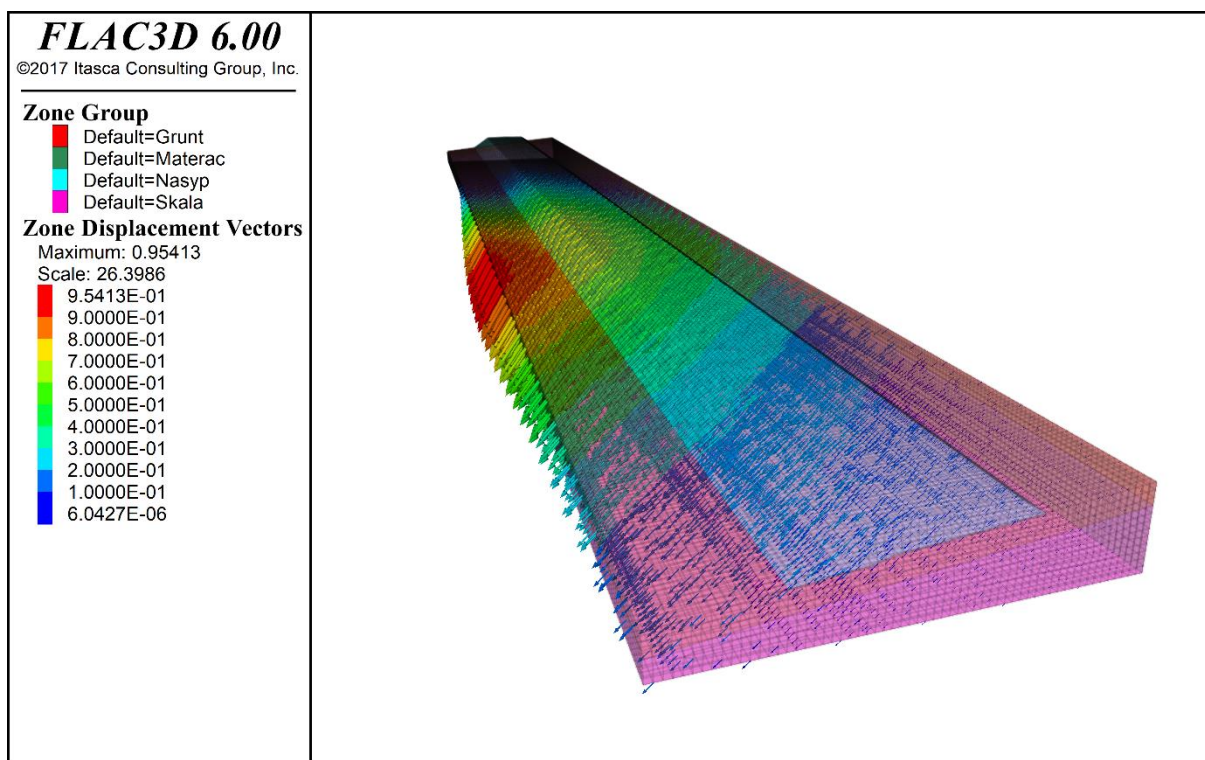
Na rysunkach 5.26-5.31 przedstawiono wyniki przestrzennej analizy numerycznej przedmiotowego nasypu. Po założeniu warunków brzegowych wykonano odpowiednią liczbę kroków obliczeniowych, uzyskując założone warunki deformacji dolnej i bocznych powierzchni modelu numerycznego. Rysunek 5.26 przedstawia wektory przemieszczeń w przekroju przez nasyp dla założonych deformacji wywołanych eksploatacją ściany 4C, z kolei rysunek 5.32 przedstawia wektory przemieszczeń w widoku ogólnym. Na rysunku tym miejsce gdzie wektory przemieszczeń przyjmują największe wartości (kolor czerwony) odpowiada lokalizacji powyżej naroża ściany 4C wchodzącego pod korpus nasypu. Dla przyjętych wcześniej parametrów hipotezy Budryka-Knothego uzyskano znaczne wartości odkształceń poziomych w koronie nasypu w kierunku prostopadłym do nasypu (czarne elipsy na rysunku 5.28) – o ok. 70% większe od wartości na powierzchni terenu. Co istotne, ich koncentracja dodatkowo negatywnie wpływa na korpus nasypu mogąc prowadzić w efekcie do powstawania spękań i szczelin o przebiegu pionowym. Analizując mapę odkształceń postaciowych również można stwierdzić występowanie dwóch stref znacznych koncentracji w korpusie nasypu (rys. 7.29). Odkształcenia postaciowe są jednym z symptomów utraty stateczności przez skarpy nasypów bądź wykopów.

Analizując lokalizację koncentracji odkształceń na rysunkach 5.28 i 5.29 można stwierdzić, że są one nieco oddalone od naroża ściany 4C wchodzącego pod nasyp, i nie do końca odpowiadają lokalizacji szczelin zaobserwowanych w rzeczywistości (rys. 7.18). Przyczyną tego może być fakt, że główne szczeliny powstały w momencie gdy ściana

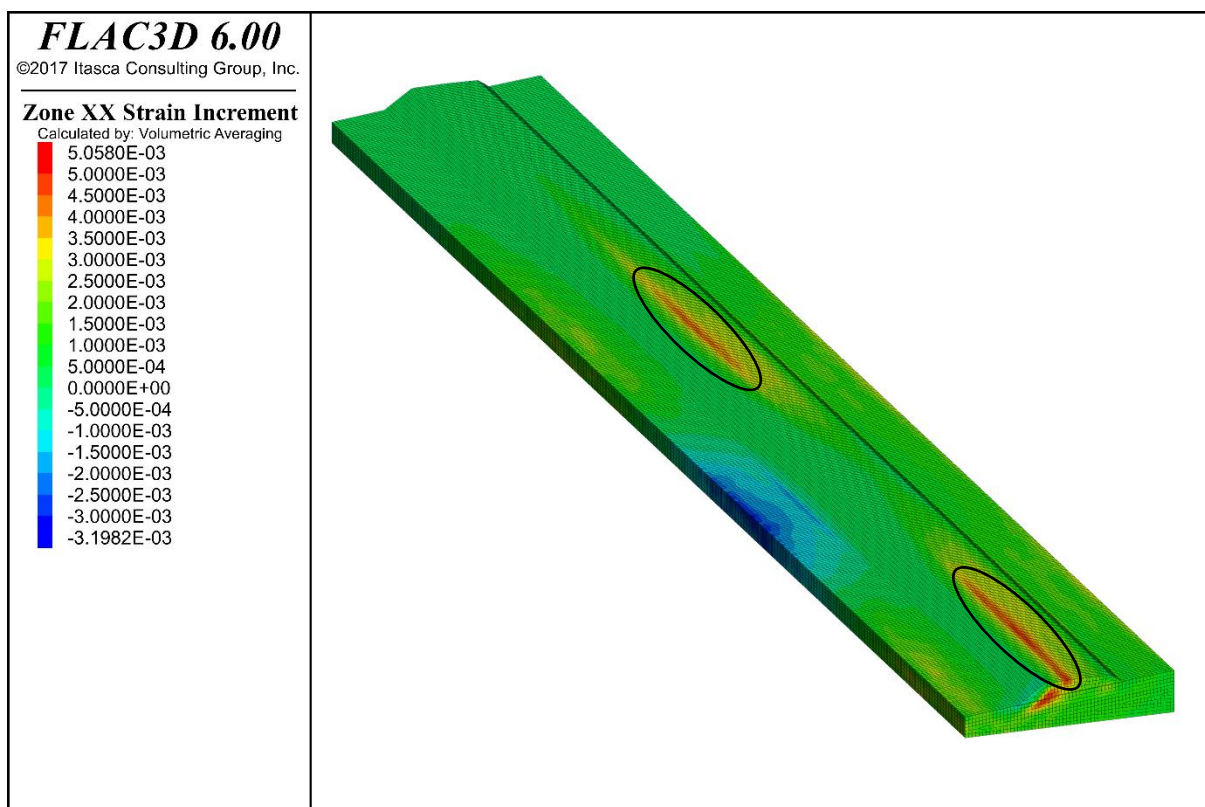
dochodziła do korpusu nasypu. Należy też zwrócić uwagę, że deformacje na powierzchni ujawniają się z pewnym opóźnieniem względem eksploatacji ściany. Dlatego też zdecydowano się przeanalizować sytuację, gdy krawędź ściany zlokalizowana jest ok. 60 m od osi nasypu. Wyniki dla tego wariantu przedstawiono na rysunkach 5.30 i 5.31. Rysunek 5.30 przedstawia mapę odkształceń poziomych w koronie nasypu, w kierunku prostopadłym do nasypu. Maksymalne wartości odkształceń na skutek eksploatacji, są podobnie jak w poprzednim wariancie istotnie większe od wartości na powierzchni terenu (o ok. 60%), natomiast ich lokalizacja jest w pełni zgodna z rzeczywiście zaobserwowanymi szczelinami. Analizując mapę maksymalnych odkształceń postaciowych również można stwierdzić znaczne koncentracje odkształceń w miejscach wystąpienia szczelin.



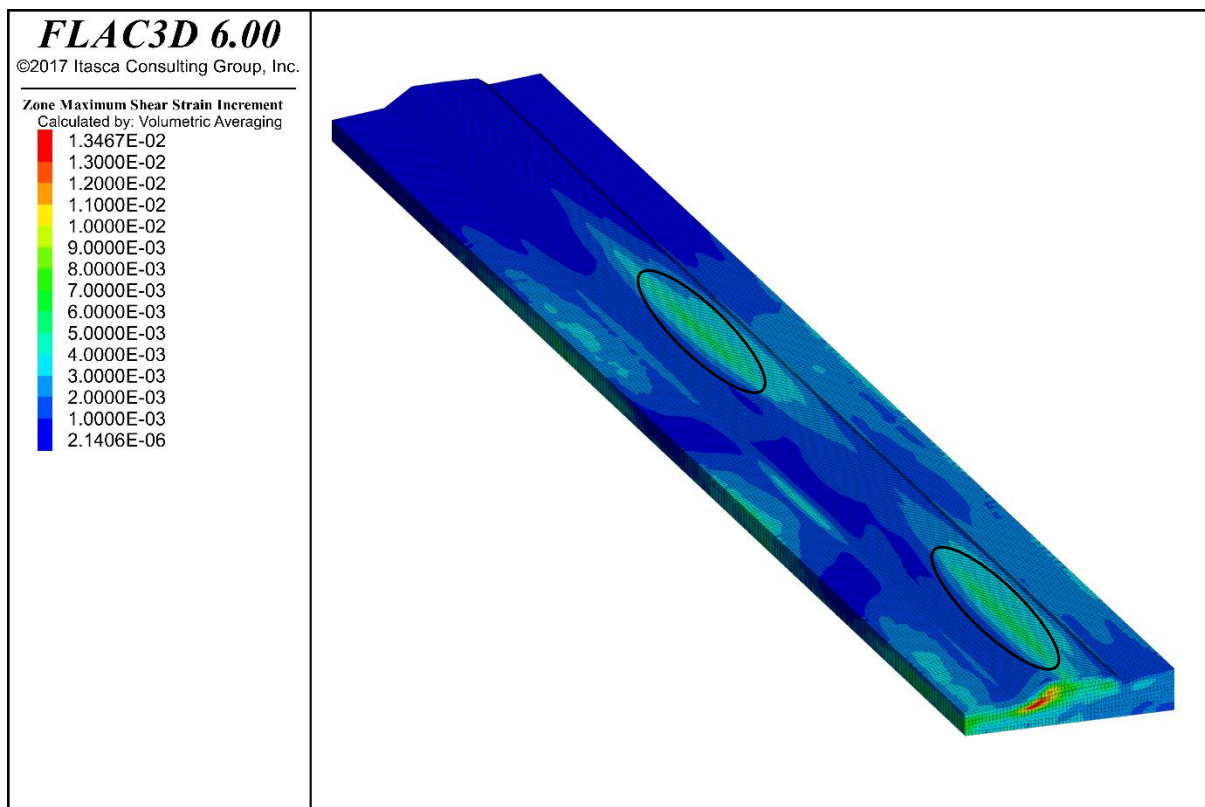
Rys. 7. 26. Wektory przemieszczeń po wyeksploatowaniu ściany 4C (w przekroju)



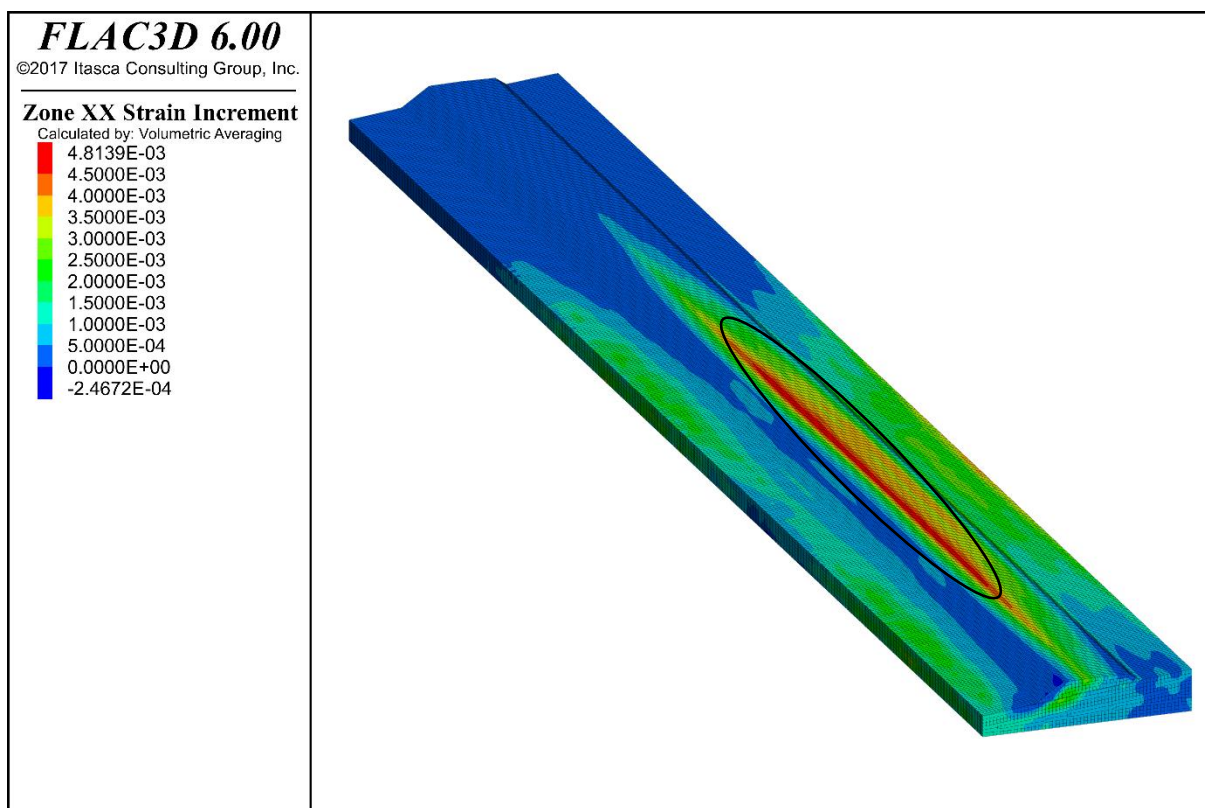
Rys. 7. 27. Wektory przemieszczeń po wyeksploatowaniu ściany 4C (widok ogólny)



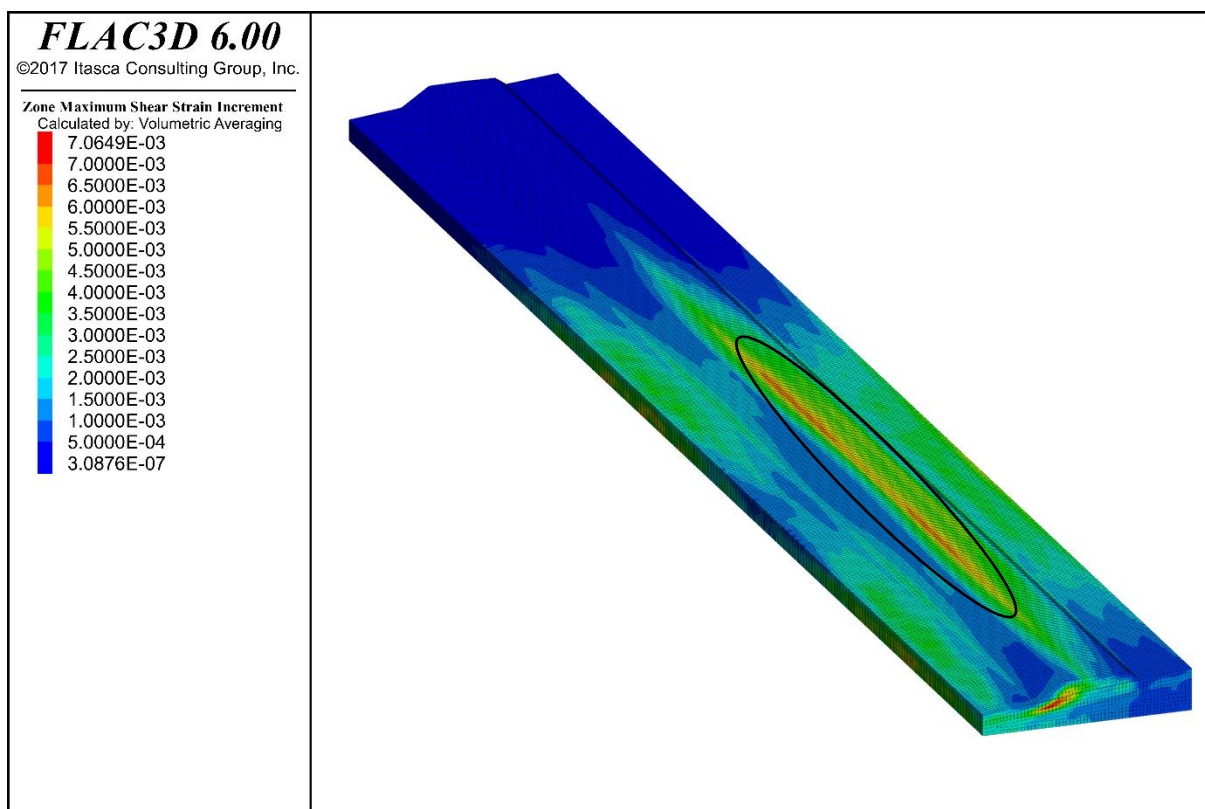
Rys. 7. 28. Mapa odkształceń poziomych w kierunku prostopadłym do osi nasypu (po wyeksploatowaniu ściany 4C)



Rys. 7. 29. Mapa maksymalnych odkształceń postaciowych (po wyeksploatowaniu ściany 4C)



Rys. 7. 30. Mapa odkształceń poziomych w kierunku prostopadłym do osi nasypu (60 m do pełnego wyeksploatowania ściany 4C)



Rys. 7. 31. Mapa maksymalnych odkształceń postaciowych (60 m do pełnego wyeksploatowania ściany 4C)

Wnioski z analizy numerycznej

Celem niniejszego rozdziału było przedstawienie możliwości użycia przestrzennej analizy numerycznej do rozwiązywania zagadnień związanych ze statecznością nasypów w skomplikowanych warunkach gruntowych. Dla wybranego zagadnienia związanego z odcinkiem autostrady A4 przebiegającym przez tereny szkód górniczych zbudowano przestrzenny model numeryczny. Następnie korzystając z hipotezy Budryka-Knothego uzyskano parametry deformacji powierzchni terenu dla rozpatrywanej eksploatacji ściany, której krawędź dochodzi pod kątem do osi przedmiotowego nasypu autostradowego.

W kolejnym etapie napisano procedurę która, zakłada w węzłach modelu numerycznego odpowiednie wartości prędkości na krok obliczeniowy. Po wykonaniu określonej liczby kroków uzyskano w efekcie sytuację, w której model nasypu poddawany był deformacjom, jak gdyby znajdował się na terenie eksploatacji górniczej.

Po przeprowadzeniu obliczeń uzyskano wyniki dość dobrze odpowiadające zaistniałej w rzeczywistości sytuacji. W koronie nasypu we fragmencie znajdującym się nad krawędzią eksploatowanej ściany 4C doszło do znacznych poziomych odkształceń o charakterze rozciągającym osiągających wartość ok. 5 mm/m – w sytuacji gdy maksymalne wartości odkształceń poziomych na powierzchni terenu wg hipotezy Budryka-Knothego wynosiły ok. 3 mm/m. Co więcej w koronie nasypu i w jego północnym korpusie stwierdzono występowanie znacznych odkształceń postaciowych, które mają kluczowe znaczenie dla zachowania stateczności takich obiektów jak nasypy i wykopu drogowe.

Podsumowując można stwierdzić, że korzystając z przestrzennej metody obliczeniowej można z dużą dokładnością odwzorować zagadnienie posadowienia obiektu w skomplikowanych warunkach gruntowych. Przeprowadzenie podobnej jak w niniejszym rozdziale analizy, ale z wykorzystaniem dwuwymiarowej analizy numerycznej pozwala stwierdzić o przyczynach i przebiegu zjawiska, natomiast nie umożliwia dokładnej oceny lokalizacji i zasięgu powstałych zjawisk.