

Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy  
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie  
Politechnika Warszawska

# WYTYCZNE WYKONYWANIA BADAŃ PODŁOŻA GRUNTOWEGO NA POTRZEBY BUDOWNICTWA DROGOWEGO

Część 2:  
Wytyczne do oceny stateczności skarp  
i zboczy na potrzeby budownictwa drogowego

# Wytyczne wykonywania badań podłoża gruntowego na potrzeby budownictwa drogowego.

## Część 2: Wytyczne do oceny stateczności skarp i zboczy na potrzeby budownictwa drogowego

---

### ZESPÓŁ AUTORSKI:

AGH

Wydział Górnictwa i Geoinżynierii

Prof. dr hab. inż. Marek Cała, mgr inż. Agnieszka Stopkowicz, dr inż. Michał Kowalski,  
mgr inż. Malwina Kolano, mgr inż. Mateusz Blajer

### KONSULTACJE:

INFORMACJE O INSTYTUCJACH, FIRMACH I OSOBACH FIZYCZNYCH, KTÓRE WZIĘŁY UDZIAŁ W KONSULTACJACH ZAMIESZCZONE ZOSTANĄ NA STRONIE INTERNETOWEJ PROJEKTU.

### ZESPÓŁ OPINIUJĄCY GENERALNEJ DYREKCJI DRÓG KRAJOWYCH I AUTOSTRAD:

mgr Artur Ładoń, mgr Tomasz Skowera, mgr Paweł Zysk

### ZESPÓŁ KONSULTACYJNY GENERALNEJ DYREKCJI DRÓG KRAJOWYCH I AUTOSTRAD:

Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad Oddział w Gdańsku

Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad Oddział w Katowicach

Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad Oddział w Lublinie

Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad Oddział w Olsztynie



## SPIS TREŚCI:

<b>1</b>	<b><i>Przedmiot i zakres stosowania Wytycznych</i></b> .....	<b>6</b>
<b>2</b>	<b><i>Podstawy formalno-prawne i wymagania krajowe w zakresie oceny stateczności</i></b> .....	<b>7</b>
2.1	Aktualnie obowiązujące przepisy prawa, normy i wytyczne w zakresie oceny stateczności	7
2.2	Zalecenia dotyczące obliczeń stateczności .....	7
2.2.1	Zalecenia ogólne .....	7
2.2.2	Sprawdzenie stanu granicznego nośności .....	9
2.2.3	Zalecenia dotyczące metod oceny stateczności skarp i zboczy .....	11
2.2.4	Minimalna wartość wskaźnika stateczności .....	13
2.2.5	Obciążenie od ruchu kołowego.....	14
<b>3</b>	<b><i>Wybór metod analizy stateczności skarp nasypów, wykopów oraz podłoża w zależności od stopnia skomplikowania warunków gruntowych</i></b> .....	<b>15</b>
<b>4</b>	<b><i>Zalecenia dla analizy stateczności skarp i zboczy na potrzeby budownictwa drogowego</i></b>	<b>18</b>
4.1	Zalecenia ogólne.....	18
4.1.1	Dokumentacje wymagające oceny stateczności skarp i zboczy .....	18
4.1.2	Planowanie badań w celu oceny stateczności .....	18
4.1.3	Zalecenia do wykonywania obliczeń stateczności .....	18
4.2	Wybór metod analizy stateczności .....	22
4.3	Kryteria oceny stateczności .....	22
4.4	Zalecenia dotyczące opracowań dokumentacji z analizy stateczności.....	22
4.5	Zalecenia stosowania przestrzennych metod analizy stateczności w odniesieniu do złożoności warunków gruntowych .....	23
4.6	Zalecenia dla analizy stateczności dużych zboczy osuwiskowych.....	23
4.7	Zalecenia dla obliczeń stateczności dla obiektów na terenach górniczych.....	24
4.8	Zalecenia dla analizy stateczności portali tuneli .....	24
<b>5</b>	<b><i>Minimalne wymagania dla obliczeń stateczności skarp i zboczy na potrzeby budownictwa drogowego</i></b> .....	<b>25</b>
<b>6</b>	<b><i>Literatura</i></b> .....	<b>26</b>
<b>7</b>	<b><i>Załączniki</i></b> .....	<b>28</b>
	Załącznik 1. Minimalny zakres parametrów geotechnicznych do analizy stateczności/analizy przemieszczeń <sup>29</sup>	
	Załącznik 2. Zalecane metody do oceny stateczności skarp i zboczy na potrzeby budownictwa drogowego .....	31
	Załącznik 3. Lista kontrolna .....	32
	Załącznik 4. Przykłady obliczeniowe.....	33
	Przykład 1 .....	33
	Przykład 2 .....	36
	Przykład 3 .....	40
	Przykład 4 .....	47





## 1 Przedmiot i zakres stosowania Wytycznych

Wytyczne określają wymagania, zasady i zalecenia dla oceny stateczności skarp i zboczy na potrzeby budownictwa drogowego.

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” (zwane dalej „Wytyczne badań podłoża.., (2018)”) oraz z uwzględnieniem aktualnie obowiązujących przepisów i norm.

Wytyczne zostały opracowane w konsultacji z przedstawicielami GDDKiA. Uwzględniają przepisy prawa krajowego (stan na dzień 30.06.2018 r.). Wytyczne dotyczą dróg zarządzanych przez Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad:

- A - autostrady,
- S - drogi ekspresowe,
- GP - drogi główne ruchu przyspieszonego,
- G - drogi główne,
- Z - drogi zbiorcze,
- L - drogi lokalne,
- D - drogi dojazdowe.

Generalny Dyrektor Dróg Krajowych i Autostrad zgodnie z zapisami ustawy o drogach publicznych zarządza drogami krajowymi, do których zalicza się m.in. autostrady i drogi ekspresowe oraz drogi leżące w ich ciągach do czasu wybudowania autostrad i dróg ekspresowych, a także drogi stanowiące ciągi obwodnicowe dużych aglomeracji miejskich (Dz.U. 2017 poz. 2222 z późn. zm.). Zgodnie z zapisami Obwieszczenia Prezesa Rady Ministrów z dnia 21 grudnia 2015 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Rady Ministrów w sprawie przedsięwzięć mogących znacząco oddziaływać na środowisko (Dz.U. 2010 nr 213 poz. 1397), do przedsięwzięć mogących zawsze znacząco oddziaływać na środowisko zalicza się m.in. autostrady i drogi ekspresowe. Zgodnie z zapisami rozporządzenia w sprawie geotechnicznych warunków posadowienia obiektów budowlanych drogi te zalicza się do trzeciej kategorii geotechnicznej.

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

Praca została sfinansowana ze środków NCBR i GDDKiA w ramach projektu Nowoczesne metody rozpoznania podłoża gruntowego w drogownictwie OT1-1E/PIG-AGH-PW (umowa nr 17.17.140.772).

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

### 2.1 Aktualnie obowiązujące przepisy prawa, normy i wytyczne w zakresie oceny stateczności

Poniżej zestawiono najważniejsze rozporządzenia oraz normy dotyczące oceny stateczności skarp i zboczy. Wskazano także wytyczne i instrukcje, których zalecenia odnoszą się do zagadnień związanych ze statecznością skarp i zboczy.

#### 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).

#### 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.

#### 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.

### 2.2 Zalecenia dotyczące obliczeń stateczności

W poniższych podpunktach zebrano najważniejsze zalecenia dotyczące oceny stateczności określone w przepisach prawa, normach oraz literaturze przedmiotu.

#### 2.2.1 Zalecenia ogólne

**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 geologiczno-inżynierską 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)** 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<sup>1</sup> i gruboziarniste w stanie średnio zagęszczonym, zagęszczonym lub bardzo zagęszczonym),
- spoiste w stanie zwartym, półzwartym i twardoplastycznym.

---

<sup>1</sup> Określenie grunty drobnoziarniste w odniesieniu do gruntów niespoistych użyto ze względu na przytoczenie zapisów zgodnych z Rozporządzeniem Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie (Dz.U. 2016 poz. 124), w pozostałych przypadkach określenie to odnosi się do gruntów drobnoziarnistych w rozumieniu norm PN-EN ISO 14688-1, PN-EN ISO 14688-2.



Sprawdzenie stanów granicznych przydatności do użytkowania drogowej budowli ziemnej, których przekroczenie uniemożliwia eksploatację 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 pochylonym 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.

## 2.2.2 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

zewnątrzne, 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 należy wyznaczyć wskaźnik wykorzystania nośności (określany także jako opór wyczerpania nośności):

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

Do obliczeń stateczności wartości obliczeniowe:

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

$$F_d = \gamma_F F_{rep}, \text{ gdzie } F_{rep} = \psi F_k \quad (3)$$

- parametrów geotechnicznych należy wyprowadzić z wartości charakterystycznych wg wzoru:

$$X_d = \frac{X_k}{\gamma_M} \quad (4)$$

albo oceniać bezpośrednio,

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

$$a_d = a_{nom} \pm \Delta a \quad (5)$$

Występowanie niewielkich odchyłek zostało już zawarte we współczynnikach ( $\gamma_F, \gamma_M$ ).

Generalnie do oceny stateczności można zastosować jedno z trzech podejść obliczeniowych wprowadzonych przez PN-EN 1997-1 (punkt 2.4.7.3.4). Podejście 3 (DA3) jest najczęściej stosowanym (63% krajów CEN) podejściem obliczeniowym do oceny stateczności skarp (Bond i Harris, 2008). Podejście DA1 stosuje 25% krajów zrzeszonych w CEN, a DA2 tylko Hiszpania.

W Polsce, zgodnie z załącznikiem krajowym (PN-EN 1997-1/Ap2, 2010), do oceny stateczności stosuje się podejście 3 (Tabela 2.1). 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). Przy sprawdzaniu stanów granicznych nośności podłoża (GEO) dla stateczności ogólnej stosuje się współczynniki częściowe A2+M2+R3 (Tabela 2.1), dla pozostałych stanów granicznych nośności podejście obliczeniowe 2 (A1+M1+R2).

W podejściu DA3 (Tabela 2.1), przy sprawdzaniu 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.

Tabela 2.1 Zestawienie współczynników częściowych stosowanych przy sprawdzeniu stanów granicznych nośności (GEO) dla stateczności ogólnej

Współczynniki częściowe			Podejście obliczeniowe 3(DA3)	
A	Oddziaływania stałe $\gamma_G$	niekorzystne	A2	1,0*
		korzystne		1,0
	Oddziaływania zmienne $\gamma_Q$	niekorzystne		1,3*
		korzystne		0
M	Parametry gruntu	Kąt tarcia wewnętrznego $\gamma_\phi^{**}$	M2	1,25
		Spójność efektywna $\gamma_{c'}$		1,25
		Wytrzymałość na ścinanie bez odpływu $\gamma_{c_u}$		1,4
		Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie $\gamma_{d_u}$		1,4
		Ciężar objętościowy $\gamma_Y$		1,0
R	Opór ścinania gruntu $\gamma_{R,e}$	R3	1,0	

\*oddziaływania geotechniczne,  
\*\* redukuje się tangens kąta tarcia wewnętrznego.

Norma PN-EN 1997-1 nie wskazuje, kiedy należy prowadzić analizy z uwzględnieniem warunków z odpływem i bez odpływu. Orr i Farrell (1999) stwierdzają, że **warunki długotrwałe są kluczową sytuacją projektową i dlatego analiza z odpływem jest tu odpowiednia, ale warunki bez odpływu są kluczowe dla sytuacji nasypów na słabym gruncie**. 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 na gruntach spoistych, dla których wymagana jest stateczność w warunkach krótkotrwałych (np. nasypy wykonywane w krótkim czasie, wykopy pod fundamenty). Bogusz (2013) wskazuje, że:

- warunki z odpływem (stateczność długotrwała) stosuje się:
  - w gruntach niespoistych o dużym współczynniku filtracji (piaski, żwiry),
  - w przypadku obciążenia gruntów słabonośnych, co odpowiada warunkom po zakończeniu konsolidacji,
  - w przypadku odciążenia gruntów spoistych (jest to najbardziej niekorzystna sytuacja obliczeniowa),

W warunkach tych należy uwzględniać efektywne parametry gruntu.

- warunki bez odpływu (stateczność krótkotrwała) stosuje się:
  - w przypadku oceny stateczności krótkotrwałej,
  - w gruntach spoistych charakteryzujących się małym współczynnikiem filtracji, przy szybkim przyroście obciążeń (w stosunku do czasu potrzebnego na rozproszenie nadwyżki ciśnienia wody).

Analiza może być prowadzona dla naprężeń całkowitych (nieznany rozkład ciśnienia wody w porach gruntu) lub naprężeń efektywnych (znany jest rozkład ciśnienia wody w porach gruntu).

Bogusz (2013) stwierdza, że warunki pośrednie (stateczność zależna od czasu) występują, gdy trudno przewidzieć najbardziej niekorzystny wariant odpływu, wówczas należy wykonać oba typy analiz.

### 2.2.3 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 również:

- 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 wskazuje, 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 i in. 2013) wyszczególnił metody równowagi granicznej, które spełniają powyższe wymagania (Tabela 2.2), a także zestawił informacje odnośnie sił oddziałujących między paskami (Tabela 2.3). Z danych w tabelach (Tabela 2.2, Tabela 2.3) wynika, że (Bond i in., 2013):

- Metoda Spencera jest akceptowana, ponieważ warunek równowagi momentów oraz sił jest spełniony.
- Metoda Bishopa Simplified jest akceptowana, gdyż równowaga momentów jest uwzględniona, a w przypadku, gdy 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 2.2 Warunki równowagi w metodach równowagi granicznej (Krahn, 2004, za Bond i in., 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 2.3 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 użytkownika
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, uwzględniający 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/przewrócenie).

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.

### 2.2.4 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. Poprzednie zapisy rozporządzenia (Dz.U. 1999 nr 43 poz. 430 – rozporządzenie nieobowiązujące) 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 określone indywidualnie metodami podanymi w Polskich Normach nie powinny być mniejsze niż 1,5*”. W aktualnej (obowiązującej) wersji rozporządzenia (Dz.U. 2016 poz. 124) zapis ten został usunięty.

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 (Tabela 2.1), które stosuje się do określenia obliczeniowych wartości wytrzymałości, oddziaływań i oporu gruntu. Zgodnie z PN-EN 1997-1 i załącznikiem krajowym do oceny stateczności ogólnej stosuje się podejście 3 (Tabela 2.1). 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 spełniona jest zależność (1) i/lub (2)

W 2.4.6.2 normy PN-EN 1997 – 1 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) odnośnie podejścia obliczeniowego 3 stwierdza: *W podejściu tym powinno się stosować 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.*

Bond i Harris (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 2.1) jest zalecany dla wszystkich typów obiektów i może prowadzić to do pomijania efektu skali. Z tego względu Bond i Harris (2008) rekomendują stosowanie współczynników częściowych (Tabela 2.1) 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 zabieg ten należy stosować z dużą ostrożnością.

## 2.2.5 Obciążenie od ruchu kołowego

Aktualnie obowiązujące przepisy nie precyzują zalecanej wartości obciążenia od ruchu kołowego, którą należy uwzględnić w obliczeniach stateczności.

Uwzględniane obciążenie od ruchu kołowego należy określić w odniesieniu do analizowanego obiektu, etapów projektowych (czas budowy, eksploatacja) oraz ocenianych warunków gruntowych (krótkotrwałe i/lub długotrwałe).

---

<sup>2</sup> 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.

Bazując na zapisach rozporządzenia (Dz.U 2012 poz. 463), 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. Wszystkie drogi zarządzane przez Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad jako obiekty budowlane 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), niezależnie od skomplikowania warunków geotechnicznych.

W Załączniku 2 wskazano zalecenia odnośnie wyboru metod obliczeń stateczności w zależności od skomplikowania warunków gruntowych oraz przedmiotu analizy. W przypadku zastosowania innych metod niż wyszczególnione w Załączniku 2, w opracowaniu zawierającym przedstawienie wyników oceny stateczności, należy uzasadnić wybór.

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 i in. (1988) oraz Mowen i in. (2011) stwierdzili, że różnica ta może dochodzić w niektórych przypadkach nawet do 30%. Według badań przeprowadzonych przez Vaughan (2008), nie jest to jednak regułą. 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, Arellano i Stark (2000) stwierdzają, że 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 (Rysunek 3.2). Obliczenia w Płaskim Stanie

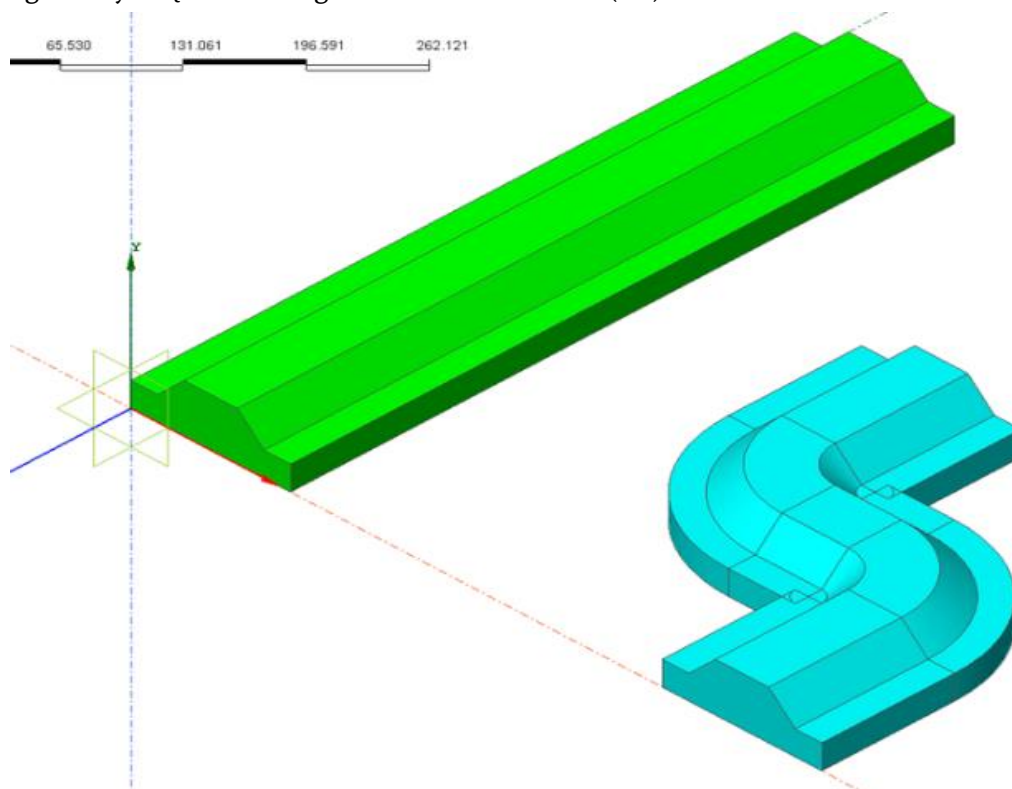
Odształcenia (2D) zakładają liniowość obiektu w kierunku prostopadłym do analizowanego przekroju i tylko w takim przypadku wyniki obliczeń są prawidłowe. Przykład takiego obiektu przedstawiono kolorem zielonym na rysunku (Rysunek 3.1). W przypadku obiektu o zmiennej geometrii (kolor niebieski - Rysunek 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 zbczu. Najprostsza jest sytuacja, gdy zbcze 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 znacznie bardziej skomplikowanym układzie (silne pofałdowania, uskoki, występowanie soczewek) należy skłaniać się do przeprowadzania obliczeń przestrzennych.

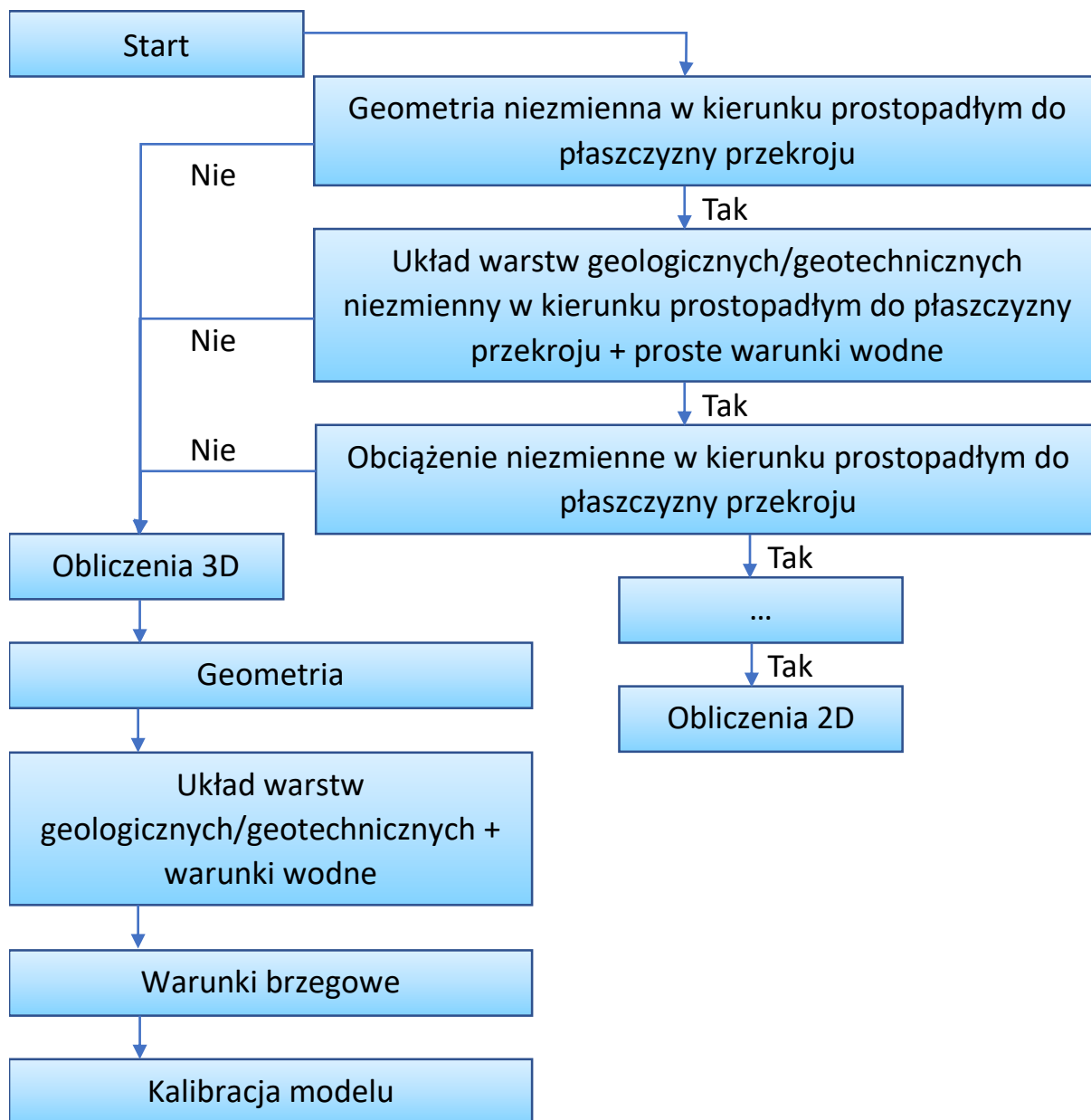
Równie istotnym kryterium jest ocena warunków wodnych. Należy uwzględnić możliwość negatywnego wpływu występowania zwierciadła wód gruntowych oraz układu warstw o różnej wartości współczynnika wodoprzepuszczalności (filtracji). Przez proste warunki wodne, wskazane na schemacie na rysunku (Rysunek 3.2), należy rozumieć brak przepływów w kierunkach innych niż w płaszczyźnie przekroju.

Kolejnym kryterium jest występowanie dodatkowych obciążeń w rejonie objętym analizą. Obciążenia takie z reguły są przykładane do powierzchni, np. od istniejących na zbczu budowli, ale mogą być również związane z deformacjami powierzchni terenu, np. na skutek eksploatacji górniczej.

Na rysunku (Rysunek 3.2) 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).



Rysunek 3.1 Kryteria wyboru – przykład geometrii niezmiennej w kierunku prostopadłym do płaszczyzny przekroju (kolor zielony) i geometrii zmiennej (kolor niebieski)



Rysunek 3.2 Schemat wyboru obliczeń - Płaski Stan Odkształcenia czy Przestrzenny Stan Naprężenia

## 4 Zalecenia dla analizy stateczności skarp i zboczy na potrzeby budownictwa drogowego

### 4.1 Zalecenia ogólne

#### 4.1.1 Dokumentacje wymagające oceny stateczności skarp i zboczy

Ocena stateczności skarp i zboczy sporządzana jest w ramach (Tabela 4.1):

- Dokumentacji geologiczno-inżynierskiej. W ramach dokumentacji geologiczno-inżynierskiej zaleca się wykonanie wstępnej oceny warunków stateczności dla zboczy naturalnych, zwłaszcza dla terenów osuwiskowych.
- Opinii geotechnicznej w przypadku obiektów budowlanych zaliczonych do pierwszej kategorii geotechnicznej.
- Projektu geotechnicznego dla obiektów zaliczonych do drugiej i trzeciej kategorii geotechnicznej.

Tabela 4.1 Dokumenty wymagające uwzględnienia oceny stateczności

Warunki gruntowe	Klasa drogi	Liczba jezdni	Dokumentacja geologiczno-inżynierska	Projekt geotechniczny (PG)
proste	A, S, GP, G	≥2	Z	W
		1	Z	W
	Z, L, D	1	ZO	W
złożone i skomplikowane	A, S, GP, G	≥2	Z	W
		1	Z	W
	Z, L, D	1	Z	W

W – wymagane, Z – zalecane, ZO – zalecane z ograniczeniami (stosować w zależności od potrzeb).

#### 4.1.2 Planowanie badań w celu oceny stateczności

W przypadku, gdy planowana jest ocena stateczności należy to uwzględnić podczas projektowania oraz planowania badań polowych i laboratoryjnych. Planowanie badań powinno być uzgadniane z projektantem projektu geotechnicznego. Plan badań powinien uwzględniać:

- Zakres badań polowych i laboratoryjnych dostosowany do warunków geologiczno-inżynierskich i geotechnicznych zgodnie z „Wytycznymi 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 geotechnicznych przebiegających prostopadle do powierzchni skarpy/zbocza.
- Zakres badań umożliwiających określenie geotechnicznych parametrów charakterystycznych na podstawie wyprowadzonych parametrów geotechnicznych zgodnie z „Wytycznymi badań podłoża...” (2018, punkt 8.3).
- W przypadku badań wykonywanych w terenie, gdzie występowały w przeszłości ruchy osuwiskowe lub na czynnych osuwiskach: lokalizację punktów badawczych umożliwiającą określenie położenia powierzchni poślizgu. Podczas pobierania rdzeni/próbek należy określić właściwie ich orientację w przestrzeni.

#### 4.1.3 Zalecenia do wykonywania obliczeń stateczności

W celu przeprowadzenia prawidłowej oceny warunków stateczności zaleca się (schemat - Rysunek 4.1):

- Przeprowadzenie wizji lokalnej analizowanego terenu oraz studia dokumentacji

- archiwalnych, wyników badań polowych i laboratoryjnych oraz opracowanych dokumentacji.
- Określenie reprezentatywnego przekroju lub przekrojów geotechnicznych przebiegających prostopadle do powierzchni skarpy/zbocza, a w przypadku gdy nie można ustalić takich przekrojów należy rozważyć wykonanie obliczeń 3D.
  - Przeprowadzić analizę i ocenę występujących warunków wodnych, ze szczególnym uwzględnieniem wahań zwierciadła wody gruntowej, zmian ciśnienia wody w porach, występowania napiętego zwierciadła wody gruntowej itp.
  - Kompleksową ocenę warunków gruntowych oraz etapów realizacji obiektu budowlanego i jego przyszłej eksploatacji pod kątem koniecznych do uwzględnienia sytuacji obliczeniowych krótkotrwałych i długotrwałych (zobacz punkt 2.2, Sprawdzenie...). Określenie warunków analizy: rodzaj warunków (z odpływem/bez odpływu) oraz rodzaj naprężeń przyjętych do obliczeń (analiza w naprężeniach całkowitych/efektywnych).
  - Określić parametry geotechniczne. 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. Ich ostateczny zakres należy określić w odniesieniu do występujących rodzajów gruntów i ich zachowania, zagadnień projektowych i konstrukcyjnych oraz wyodrębnionych stanów granicznych.
  - 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, gdy konsekwencje zniszczenia są wyjątkowo duże, bądź stosowania niekonwencjonalnych metod projektowania należy rozważyć zastosowanie większego zapasu bezpieczeństwa. Współczynniki częściowe określone w Eurokodzie 7 wprowadzają minimalny zapas bezpieczeństwa dla konwencjonalnych metod i typowych obiektów.
  - Dla osuwisk 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,
    - układ warstw geologicznych/geotechnicznych 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 użytkowalności 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.
  - Ocenę warunków stateczności przy uwzględnieniu odpowiedniego dla analizowanego obiektu budowlanego kryterium stateczności.

- W przypadku projektowania zabezpieczeń i/lub 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.).
- Ocenić współpracę projektowanego zbrojenia z gruntem (np. przedstawić siły osiowe w elementach zbrojenia).

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

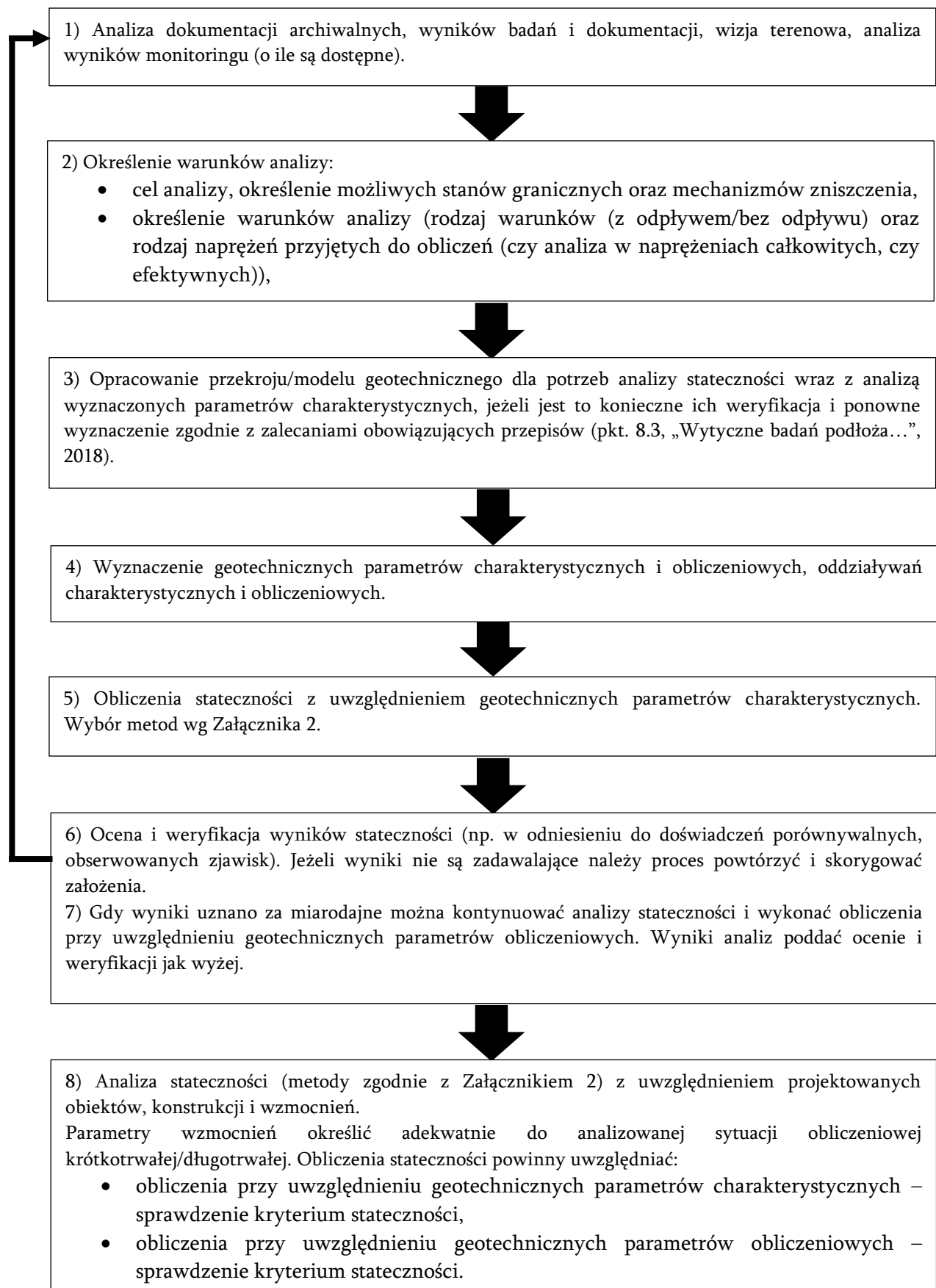
**Tabela 4.2 Ryzyko oraz wymagania odnośnie badań geotechnicznych**

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

Na podstawie Bond i Harris (2008)

Na rysunku (Rysunek 4.1) przedstawiono poszczególne etapy oceny stateczności.





Rysunek 4.1 Schemat postępowania przy obliczeniach stateczności

## 4.2 Wybór metod analizy stateczności

Zalecenia dla wyboru metod obliczeniowych zawarto w Załączniku nr 2. Wybór metod należy poprzedzić analizą inżynierską i uzasadnić w opracowaniu wyników.

## 4.3 Kryteria oceny stateczności

W obliczeniach stateczności w warunkach krótkotrwałych i długotrwałych zaleca się spełnienie dwóch warunków:

- przy zastosowaniu parametrów charakterystycznych i wyznaczanym globalnym wskaźniku stateczności wykazać, że dla obiektów drogowych spełniony jest warunek  $FS \geq 1,5$ ,

oraz

- przy uwzględnieniu wymogów PN-EN 1997-1 i zastosowaniu odpowiednich współczynników częściowych (Tabela 2.1) wykazać, że spełniony jest warunek wg wzoru (1) lub (2).

Gdy ryzyko dla życia i mienia jest oceniane jako duże (Tabela 4.2), powinny zostać rozważone wyższe wartości współczynników częściowych. Ostateczną decyzję o konieczności zwiększenia zapasu bezpieczeństwa podejmuje projektant. Wymóg zwiększonego bezpieczeństwa może być wprowadzony również przez Zamawiającego.

Zaleca się dla obiektów trzeciej kategorii geotechnicznej przyjmowanie, zgodnie z dotychczasową praktyką, obciążenie od ruchu kołowego o wartości 25kPa (wartość charakterystyczna).

## 4.4 Zalecenia dotyczące opracowań dokumentacji z analizy stateczności

Opracowanie zawierające ocenę stateczności powinno zawierać:

- Informacje o zastosowanej metodzie obliczeń oraz narzędziu obliczeniowym.
- Lokalizację przekrojów geologiczno-inżynierskich i geotechnicznych dla których wykonano obliczenia stateczności.
- Przekroje geologiczno-inżynierskie i przekroje geotechniczne będące podstawą opracowania modelu obliczeniowego.
- 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.
- Wytypowanie i uzasadnienie wybranych możliwych mechanizmów zniszczenia.
- Opracowane modele obliczeniowe przygotowane do obliczeń stateczności wraz z przedstawieniem przebiegu warstw, przyjętych warunków brzegowych, uwzględnionego podziału bryły osuwiskowej na paski (metody równowagi granicznej) / zdefiniowanej siatki elementów (metody numeryczne), oddziaływań zewnętrznych, warunków wodnych.
- Wyniki obliczeń przedstawione w formie graficznej odwzorowujące zasięg powierzchni podłożu wraz z określoną wartością wskaźnika stateczności.
- Ocenę warunków stateczności i wnioski podsumowujące.

W załączniku 3 przedstawiono listę kontrolną dla weryfikacji zakresu wykonanej oceny stateczności.

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

W punkcie 3 wskazano procedurę pozwalającą określić warunki, gdy zalecane jest wykonanie obliczeń przestrzennych (3D). W przypadku takich obliczeń należy zwrócić uwagę na konieczność budowy modelu obliczeniowego o odpowiednich wymiarach. Opracowanie modelu przestrzennego wymaga zebrania danych, które umożliwią:

- odwzorowanie powierzchni terenu,
- odwzorowanie przebiegu warstw geotechnicznych,
- uwzględnienie warunków wodnych.
- uwzględnienie występujących obiektów na terenie objętym analizą.

W modelu obliczeniowego należy odpowiednio uwzględnić warunki brzegowe. W pracach poświęconych analizie stateczności skarp w 3D dość rzadko można spotkać dokładne sformułowanie warunków brzegowych rozpatrywanego problemu. Wykładnię tego problemu przedstawiono w pracy Cała (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.

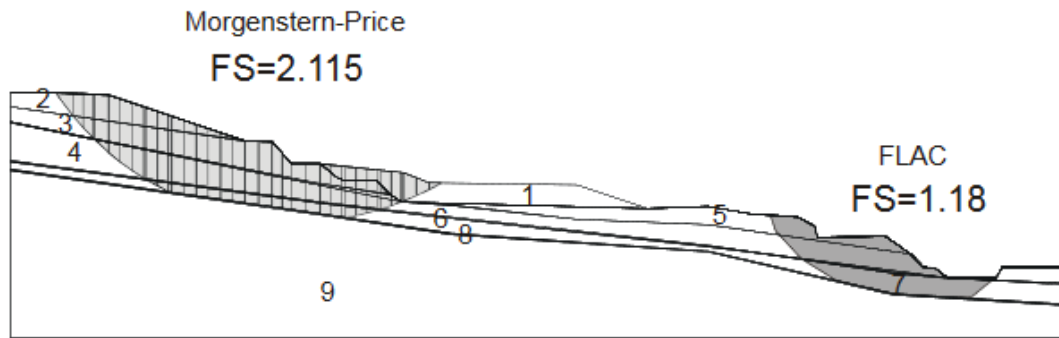
Ich przyjęcie spowoduje, że utrata stateczności zbocza musi wystąpić z powodów naturalnych, w pewnym oddaleniu od krawędzi modelu. Jeżeli zidentyfikowana (np. za pomocą metody redukcji wytrzymałości na ścinanie) powierzchnia poślizgu przecina którąś z powierzchni brzegowych modelu (dolną lub boczne) 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. i in.

#### **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 (Cała i Flisiak 2000; Stopkowicz i Cała, 2004). 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. Wyniki te przedstawiono na rysunku (Rysunek 4.2).



Rysunek 4.2 Zestawienie wyników analiz stateczności dla zbocza o skomplikowanej budowie otrzymanych za pomocą metody redukcji wytrzymałości na ścinanie i metody Morgersterna-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 miarodajnej analizy konieczne jest zastosowanie metod numerycznych.

Dla zboczy o skomplikowanej budowie zaleca się wykonanie obliczeń stateczności dwoma metodami:

- metody równowagi granicznej – metody uwzględniające niewalcowe powierzchnie poślizgu.
- metodą redukcji wytrzymałości na ścinanie.

#### 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. Należy sprawdzić warunki stateczności obiektu przy uwzględnieniu prognozowanych deformacji powierzchni.

#### 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 przeprowadzenie analizy przemieszczeń podczas prowadzenia budowy. Analizy te pozwolą na korelację wyników obliczeń stateczności z wynikami monitoringu. W przypadku znacznych różnic może się okazać, że konieczne będzie zweryfikowanie przyjętych założeń.

## 5 Minimalne wymagania dla obliczeń stateczności skarp i zboczy na potrzeby budownictwa drogowego

Obliczenia stateczności powinny zawierać ocenę co najmniej:

- warunków długotrwałych (naprężenia efektywne) z uwzględnieniem parametrów efektywnych,
- warunków krótkotrwałych (naprężenia całkowite) z uwzględnieniem wytrzymałości na ścinanie bez odpływu.

Wybór warunków powinien być poprzedzony szczegółową analizą uwzględniającą występujące rodzaje gruntów, czas przyłożenia i trwania obciążenia w odniesieniu do czasu potrzebnego do rozproszenia nadwyżki ciśnienia wody w porach (zobacz punkt 2.2, Sprawdzenie...).

Dla warunków wymagających oceny stateczności, sprawdzenie warunków stateczności powinno być wykonane z częstotliwością zgodnie z tabelą (Tabela 5.1). Obliczenia należy wykonać dodatkowo w rejonach występowania niekorzystnych warunków oraz miejscach budzących wątpliwość (np. znaczna różnica warunków geologicznych, różne wyniki oceny stateczności).

**Tabela 5.1 Odległość przekrojów poddawanych ocenie stateczności**

Warunki gruntowe	Klasa drogi	Liczba jezdni	Odległość analizowanych przekrojów*
proste	A, S, GP, G	$\geq 2$	$\leq 150$ m
		1	
	Z, L, D	1	$\leq 300$ m
złożone i skomplikowane	A, S, GP, G	$\geq 2$	$\leq 100$ m
		1	$\leq 100$ m
	Z, L, D	1	$\leq 150$ m

Na 1 km drogi, dla każdego krytycznego przekroju (w którym stwierdzono najbardziej niekorzystne warunki) obliczenia należy przeprowadzić dwiema, różnymi metodami.  
 \* Do obliczeń należy wybierać przekroje w których stwierdzono najbardziej niekorzystne warunki geotechniczne.

W przypadku osuwisk obliczenia stateczności powinny zostać wykonane dla przekroju/przekrojów geologiczno-inżynierskich zlokalizowanych w obrębie osuwiska oraz dla przekrojów konturujących (poza osuwiskiem). Należy także rozważyć wykonanie obliczeń na zasadzie analizy odwrotnej.

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

Wybór metod oceny stateczności zgodnie z punktem 4.2 i Załącznikiem 2. Kryteria oceny stateczności zgodnie z punktem 4.3. Ostatecznego wyboru metod obliczeniowych dokonuje projektant na podstawie analizy warunków geotechnicznych i projektowanych obiektów.

## 6 Literatura

- Abramson L.W., Lee T.S., Sharama S., Boyce G.M., 1996: Slope stability and stabilization methods. Wiley, Canada
- 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 i in.), Reston, VA: ASCE, s. 18-32.
- Bogusz W., 2013. Stosowanie współczynników częściowych do parametrów geotechnicznych według Eurokodu 7 w obliczeniach stateczności metodą elementów skończonych. Acta Scientiarum Polonorum, Architectura 12 (3), 27–38.
- 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](http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/doc/2013_06_WS_GEO/report/2013_06_WS_GEO.pdf)
- Bond A. J., Harris, A. J., 2008. Decoding Eurocode 7, Taylor & Francis (reprinted 2012).
- British Standards. Code of practice for earthworks BS6031:2009.
- 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).
- Cała M., 2007. Numeryczne metody analizy stateczności skarp. Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne AGH. Seria Rozprawy-Monografie. Nr 171.
- 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.
- Cała M., Flisiak J., 2000: Analiza stateczności skarp i zboczy w świetle obliczeń analitycznych i numerycznych, XXIII Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej, str. 27–37.
- Cała M., Flisiak J., 2002: Analiza wpływu słabej warstwy na stateczność skarp, XXV Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej, str. 83–92.
- Cała M., Cieślak J., Flisiak J., Kowalski M. 2006a. 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).
- Cała M., Cieślak J., Flisiak J., Kowalski M. 2006b. 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).
- Cavounidis, S., 1987. On the ratio of factor of safety in slope stability analyses. Geotechnique. Vol. 37 (2), s. 207-210.
- 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.
- 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.
- Gens A., Hutchinson J., Cavounidis S., 1988. Three-dimensional analyses of slides in cohesive soils. Geotechnique. Vol. 38 (1), s. 1-23.
- Griffiths D.V., Marquez R.M., 2007. Three-dimensional slope stability analysis by elasto-plastic finite elements. Geotechnique. Vol. 57, s. 537-546.



- 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.
- 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.
- Kockar M.K., Akgun H.: Engineering geological investigations along the Iliku Tunnels Alanya, southern Turkey. *Engineering Geology*, pp. 141-158, Vol 68, 2003.
- Kowalski M., 2014. *Metodyka oceny warunków stateczności skarp o złożonej geometrii i budowie geologicznej*. (Niepublikowana praca doktorska), Kraków, AGH
- 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.
- 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.
- Orr T. L.L., Farrell E. R., 1999. *Geotechnical Design to Eurocode 7*. Springer
- Satici O, Ünver B. Assessment of tunnel portal stability at jointed rock mass: A comparative case study. *Computers and Geotechnics* 64 (2015) 72–82.
- Stopkowicz A., Cała M. 2004. Analiza stateczności zboczy zlokalizowanych we fliszu karpackim z zastosowaniem metod numerycznych. XXVII Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej.
- 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.
- 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 (Tabela 7.1 i Tabela 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 do analizy stateczności/analizy przemieszczeń dla gruntów i skał

Parametr	Grunty			Skała/Masyw skalny
	Gruboziarniste	Drobnziarniste	Organiczne	
<b>Parametry podstawowe</b>				
Wilgotność naturalna	W	W	W	W
Analiza sitowa	W	W	ND	ND
Gęstość objętościowa	W	W	W	W
Granice Atterberga (granice konsystencji)	ND	W	ND	ND
Stan gruntu (ID/ IC/ IL)	W	W	ND	ND
Wytrzymałość na ścinanie bez odplywu	ND	W	W	ZO
Wytrzymałość na ścinanie z odplywem (efektywna)	W	W	W	ZO
Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie	ND	ND	ND	W
Wytrzymałość na rozciąganie	ND	ND	ND	W
Wskaźnik jakości masywu skalnego (np.: RMR, Q)	ND	ND	ND	W
Charakterystyka nieciągłości	ND	ND	ND	W
Poziom zwierciadła wody gruntowej/ Minimalny i maksymalny poziom zwierciadła wody gruntowej	W	W	W	W
Współczynnik filtracji	Z	Z	Z	Z
Ciśnienie porowe	Z	Z	Z	Z
<b>Rozszerzenie parametrów podstawowych w przypadku analizy przemieszczeń/odkształceń</b>				
Moduł ściśliwości pierwotny i wtórny/Edometryczny moduł ściśliwości pierwotny i wtórny	W	W	W	ND
Moduł Younga/Moduł odkształcenia	W	W	W	W
Współczynnik Poissona/Współczynnik rozszerzalności bocznej	Z	Z	Z	Z
Wskaźnik porowatości	W	W	W	W

Oznaczenia: W – wymagane, Z – zalecane, ZO – zalecane z ograniczeniami (w zależności od potrzeb), ND – nie dotyczy

Tabela 7.2 Minimalny zakres parametrów geotechnicznych do analizy stateczności/analizy przemieszczeń/odkształceń dla gruntów antropogenicznych

Parametr	Zakres badań			
	Materiały pochodzenia naturalnego stosowane do wznoszenia nasypów (piaski, żwiry, pospółki)	Uboczne produkty spalania (UPS)	Mieszanki stabilizowane hydraulicznie z uwzględnieniem UPS	Mieszanki stabilizowane hydraulicznie
Właściwości chemiczne*	ND	W	W	ND
Długoterminowe parametry wytrzymałościowe	ND	W	W	W
Ciśnienie pęcznienia	ND	W	W	ND
Długoterminowe badania ciśnienia pęcznienia	ND	W	W	ND

Oznaczenia: W – wymagane, Z – zalecane, ZO – zalecane z ograniczeniami (w zależności od potrzeb), ND-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).

UWAGA: Pozostałe parametry zgodnie z tabelą (Tabela 7.1) w zależności od zakwalifikowania materiału.

## Załącznik 2. Zalecane metody do oceny stateczności skarp i zboczy na potrzeby budownictwa drogowego

Tabela 7.3 Zalecane metody do oceny stateczności

Warunki gruntowe	Klasa drogi	Liczba jezdni	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	
proste	A, S, GP, G	≥2	NZ	ZO	Z	Z	NW	-
		1	NZ	ZO	Z	Z	NW	-
	Z, L, D	1	NZ	ZO	Z	Z	NW	-
złożone i skomplikowane	A, S, GP, G	≥2	NZ	NZ	Z	Z	Z	-
		1	NZ	NZ	Z	Z	Z	-
	Z, L, D	1	NZ	ZO	Z	Z	NW	-
<b>Zalecane metody w odniesieniu do przedmiotu analizy</b>								
Zbocze (gruntowe, gruntowo-skalne)			NA	NZ	Z	Z	Z	NA
Tereny osuwiskowe			NA	NZ	Z	Z	Z	NA
Obszary objęte aktywnymi wpływami eksploatacji górniczej			NA	NZ	NZ	Z	Z	NA
Portale tuneli			NA	NZ	Z	Z	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 aplikacji tak złożonych 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

UWAGA 1: Wybór metod obliczeniowych należy poprzedzić oceną inżynierską.

UWAGA 2: Dla każdego krytycznego przekroju na 1 km drogi, w którym stwierdzono najbardziej niekorzystne warunki, obliczenia należy przeprowadzić dwiema różnymi metodami.

UWAGA 3: W przypadku zmiany założeń (np. zmiany metody zbrojenia) obliczenia należy powtórzyć.

### Załącznik 3. Lista kontrolna

Tabela 7.4 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). Uwaga: Wyznaczenie geotechnicznych parametrów charakterystycznych musi być wykonane odpowiednio do kategorii obiektu budowlanego (patrz 8.3, „Wytoczne 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, uwzględnionego podziału bryły osuwiskowej na paski (metody równowagi granicznej), zdefiniowanej siatki elementów (metody numeryczne), 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 obliczenia z uwzględnieniem geotechnicznych parametrów charakterystycznych.				
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 wskazaniem 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 z częstotliwością zgodną z tabela (Tabela 5.1). W przypadku osuwiska obliczenia należy wykonać 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. Przykłady 1 – 3 opracowano na podstawie Bond i Harris (2008). 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. Programy zastosowane do obliczeń przedstawionych w przykładach, to jedno z wielu dostępnych narzędzi do obliczeń stateczności skarp i zboczy.

### Przykład 1

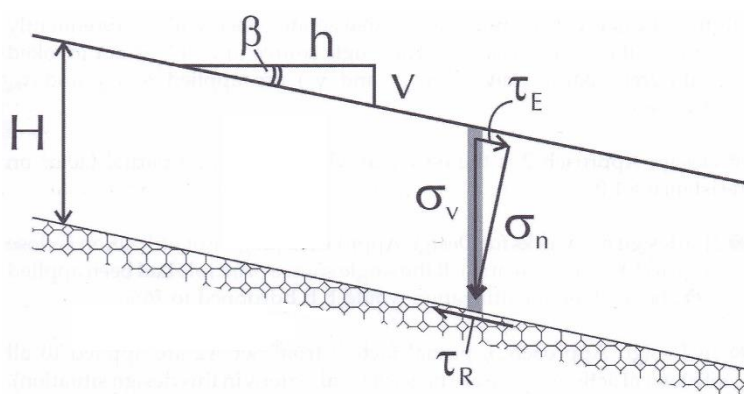
Należy ocenić stateczność skarpy o nieograniczonej długości (Rysunek 7.1). W podłożu skarpy występują utwory skalne. Skarpa nie jest zawadniona. Miąższość utworów gruntowych wynosi  $H=5\text{m}$ .

Przykład opracowany na podstawie Bond i Harris (2008).

Założenia:

	Oznaczenie	Wariant 1	Wariant 2
Nachylenie skarpy	$\beta$	18.4 (1:3)	33.7 (1:1.5)
Efektywny kąt tarcia wewnętrznego	$\varphi'_k$	25	30
Efektywna spójność	$c'_k$	2	2
Ciężar objętościowy	$\gamma_k$	18	18

k – oznaczenie wartości charakterystycznych



Rysunek 7.1 Skarpa o nieograniczonej długości

Warunki gruntowe proste. Do obliczeń zastosowano rozwiązanie zamknięte.

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:

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

Obliczeniowe naprężenia normalne:

$$\sigma_{nd} = \gamma_G \cdot \sigma_{nk} = 81 \text{ kPa}$$

Obliczeniowe naprężenia styczne:

$$\tau_{Ed} = \gamma_G \cdot \tau_{Ek} = 27 \text{ kPa}$$

Wartości obliczeniowa:

- efektywnego kąta tarcia:

$$\varphi'_d = \tan^{-1} \frac{\tan(\varphi'_k)}{\gamma_\varphi} = 20.5^\circ$$

- efektywnej spójności:

$$c'_d = \frac{c'_k}{\gamma_c} = 1.6 \text{ kPa}$$

Obliczeniowy opór ścinania:

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

Sprawdzenie warunku:

$$\frac{R_d}{E_d} \geq 1, \text{ tj. czy } \frac{\tau_{Rd}}{\tau_{Ed}} = \frac{31.8}{27} = 1.18 \geq 1, \text{ zatem warunek (wz\u00f3r 1) jest spe\u0142niony.}$$

Wska\u017anik wykorzystania no\u015bno\u015bci:

$$\Lambda_{GEO,3} = \frac{\tau_{Ed}}{\tau_{Rd}} = 85\% - \text{skarpa spe\u0142nia warunki.}$$

Obliczenia przeprowadzone przy uwzgl\u0119dzeniu parametr\u00f3w charakterystycznych wskazuj\u0105 FS=1.47 (brak spe\u0142nienia wymog\u00f3w FS $\geq$ 1,5).

### Obliczenia dla wariantu 2:

Powierzchnia kontaktu na jednostk\u0119 szeroko\u015bci i biegu skarpy:

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

Napr\u0119żenia pionowe:

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

Napr\u0119żenia normalne do powierzchni po\u015blizgu:

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

Napr\u0119żenia styczne do powierzchni po\u015blizgu:

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

Obliczeniowe napr\u0119żenia normalne:

$$\sigma_{nd} = \gamma_G \cdot \sigma_{nk} = 62.3 \text{ kPa}$$

Obliczeniowe napr\u0119żenia styczne:

$$\tau_{Ed} = \gamma_G \cdot \tau_{Ek} = 41.5 \text{ kPa}$$

Warto\u015bci obliczeniowe:

- efektywnego k\u0105ta tarcia:

$$\varphi'_d = \tan^{-1} \frac{\tan(\varphi'_k)}{\gamma_\varphi} = 24.8^\circ$$

- efektywnej sp\u00f3jno\u015bci:

$$c'_d = \frac{c'_k}{\gamma_c} = 1.6 \text{ kPa}$$

Obliczeniowy op\u00f3r \u015bcinania:

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

Sprawdzenie warunku:

$$\frac{R_d}{E_d} \geq 1 \text{ tj. czy } \frac{\tau_{Rd}}{\tau_{Ed}} = \frac{30.4}{41.5} = 0.73 < 1 \text{ zatem warunek wg wzoru (1) nie jest spe\u0142niony.}$$

Op\u00f3r wyczerpania no\u015bno\u015bci (wska\u017anik wykorzystania no\u015bno\u015bci):

$$\Lambda_{GEO,3} = \frac{\tau_{Ed}}{\tau_{Rd}} = 137\% - \text{skarpa nie spe\u0142nia warunk\u00f3w wg zale\u017cn\u00f3\u015bci (2).}$$

Przy zastosowaniu oblicze\u0144 dla parametr\u00f3w charakterystycznych warto\u015b\u0107 wska\u017anika stateczno\u015bci dla za\u0142o\u017ce\u0144 wariantu 2 wynosi FS=0.91 (skarpa niestateczna). Zalecane jest podj\u0119cie dzia\u0142a\u0144 maj\u0105cych na celu popraw\u0119 warunk\u00f3w stateczno\u015bci.

## Przykład 2

Rozważmy wykop o pochyleniu skarpy  $\beta=240$ . Wykop buduje 1,5 m warstwa piasków, poniżej zalegają piaski gliniaste. W wykopie przebiega droga. Przebieg zwierciadła wody gruntowej (ZWG) przedstawiono na rysunku (Rysunek 7.2). Obciążenie od ruchu kołowego przyjęto  $q=25$  kPa.

Przykład opracowany na podstawie Bond i Harris (2008).

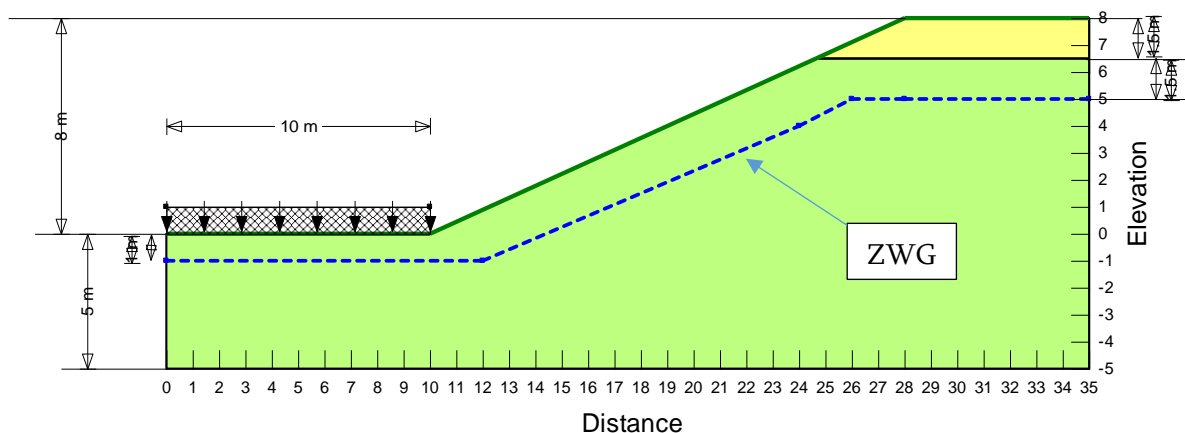
Obliczenia wykonano programem Slope/W z pakietu Geostudio (2018). Obliczenia stateczności przeprowadzono przy zastosowaniu metody Bishopa należącej do grupy metod równowagi granicznej. Powierzchnie poślizgu definiowano metodą Entry-Exit (metoda definiowania lokalizacji powierzchni poślizgu za pomocą odcinków określających położenie początku i końca powierzchni poślizgu). 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 (Tabela 7.5). 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

Właściwości	Efektywne parametry charakterystyczne		Efektywne parametry obliczeniowe		
	Piasek	Piasek gliniasty	Współczynniki DA3	Piasek	Piasek gliniasty
Ciężar objętościowy $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	18	20	1	18	20
Spójność $c'$ [kPa]	0	5	1.25	0	4
Kąt tarcia wewn. $\phi'$ [°]	35	23	1.25	29.25	18.76
Obciążenie $q$ [kPa]	25		0*	0	
Wymagana wartość FS	$\geq 1.5$		$\geq 1.0$		
Wyznaczona wartość FS	1.245 (Rysunek 7.3)		0.996 (Rysunek 7.4)		
Wskaźnik wykorzystania nośności [%]	120.5		100.4		
Komentarz	Warunek niespełniony		Warunek niespełniony		

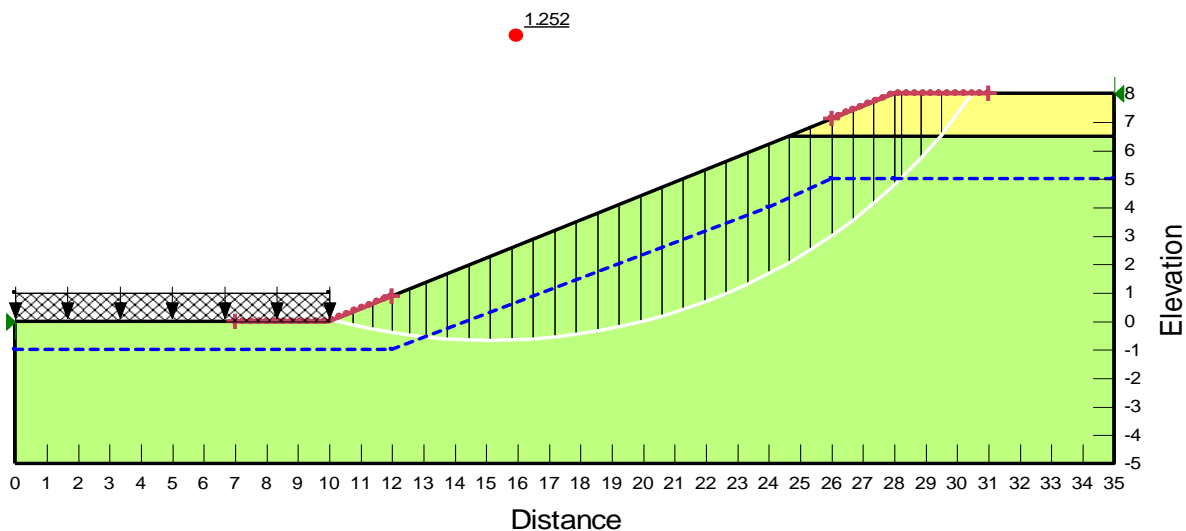
\* sprawdzono wpływ dodanego obciążenia, w tym przypadku działa ono korzystnie stąd wartość.  $\gamma_Q = 0$

Geometrię analizowanej skarpy przedstawia rysunek (Rysunek 7.2).

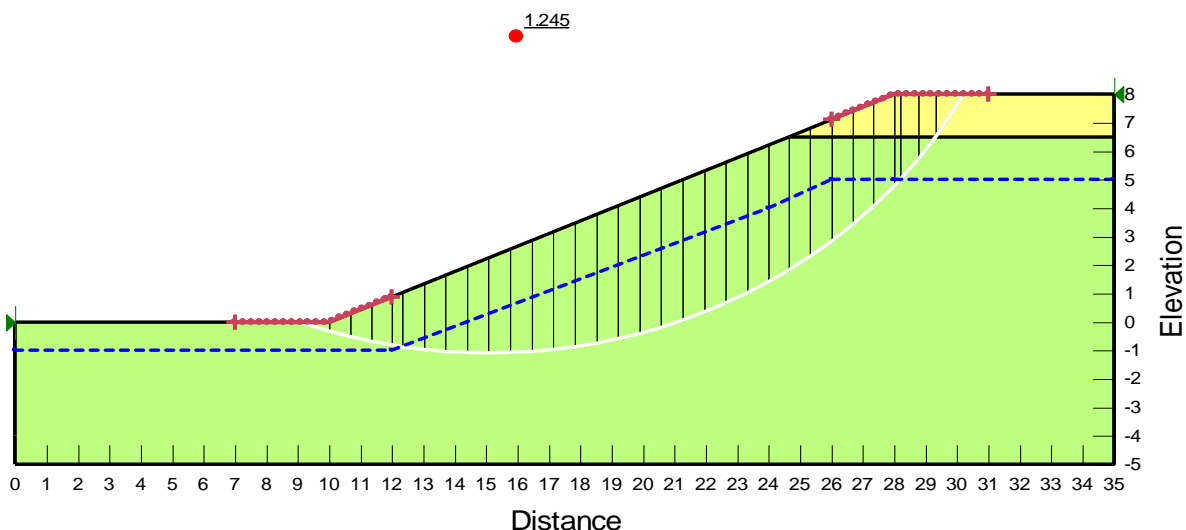


Rysunek 7.2 Geometria analizowanej skarpy

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



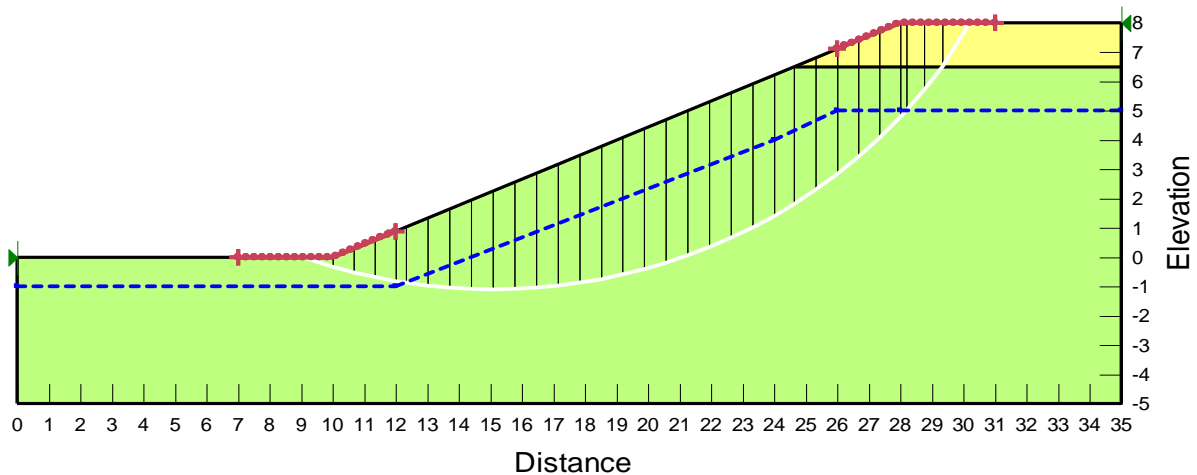
Color	Name	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)
	Piasek gliniasty	20	5	23
	Piaski	18	0	35



Rysunek 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 <sup>3</sup> )	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)
	Piasek gliniasty	20	4	18.756
	Piaski	18	0	29.256

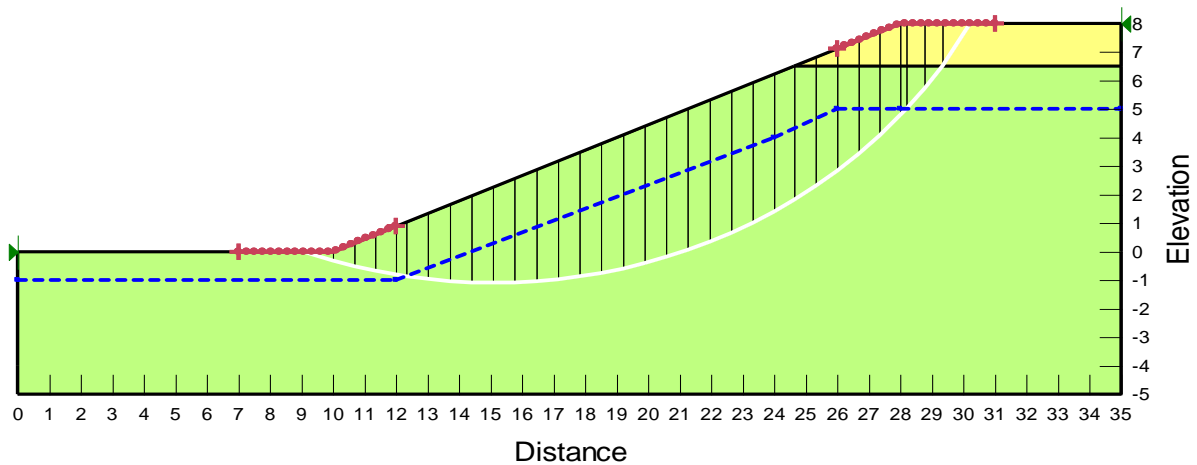
0.996



Rysunek 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

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

1.004 (DoU)



Rysunek 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

Na rysunku (Rysunek 7.5) 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).

### 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 rysunkach (Rysunek 7.6, Rysunek 7.11).

Przykład opracowany na podstawie Bond i Harris (2008).

Charakterystyczne obciążenie od ruchu kołowego przyjęto o wartości 25 kPa.

Obliczenia przeprowadzono przy zastosowaniu metody Bishopa należącej do grupy metod równowagi granicznej oraz metody redukcji wytrzymałości na ścinanie (obliczenia metodą numeryczną).

Dla każdej z metod obliczenia wykonano dla warunków:





- Obliczenia dla warunków krótkotrwałych (naprężenia całkowite) wykonane przy zastosowaniu (warunki bez odpływu)
- Obliczenia dla warunków długotrwałych (warunki z odpływem).

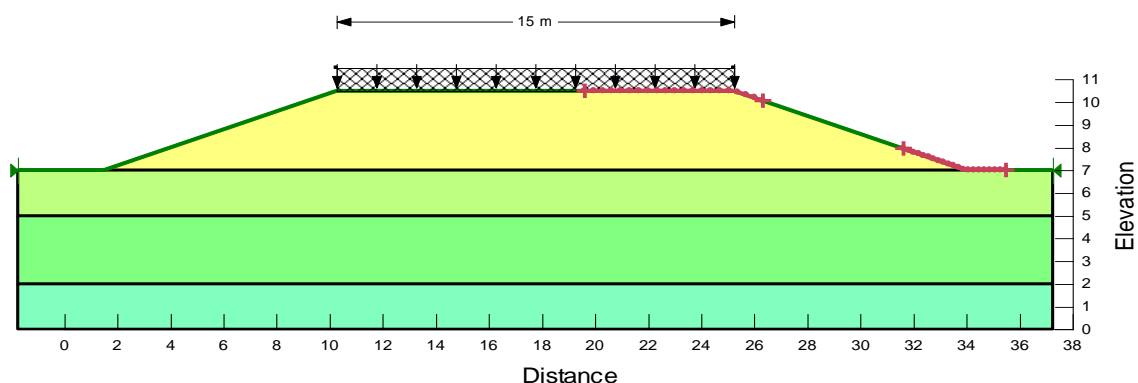
#### OBLICZENIA PRZY ZASTOSOWANIU METOD RÓWNOWAGI GRANICZNEJ

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

Tabela 7.6 Zestawienie parametrów geotechnicznych przyjętych do obliczeń

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

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

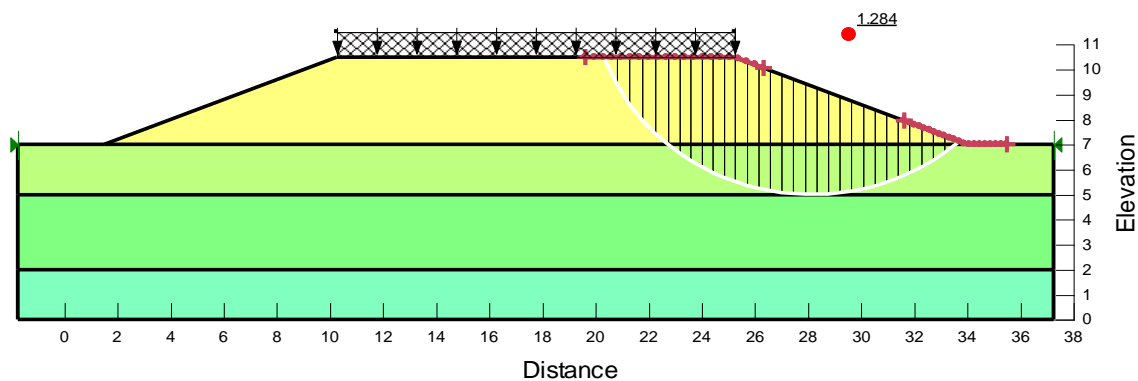


Rysunek 7.6 Model obliczeniowy z uwzględnieniem parametrów charakterystycznych dla warunków bez odpływu



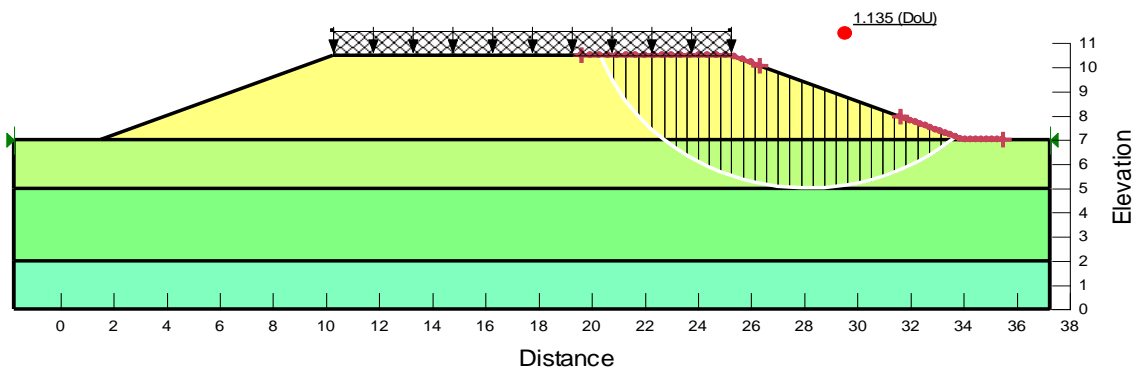
**OBLICZENIA DLA WARUNKÓW KRÓTKOTRWAŁYCH (WARUNKI BEZ ODPLYWU)**

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







Rysunek 7.7 Zasięg powierzchni poślizgu dla wskaźnika stateczności FS=1.284 wyznaczonego metodą Bishopa przy uwzględnieniu geotechnicznych parametrów charakterystycznych dla warunków bez odpływu

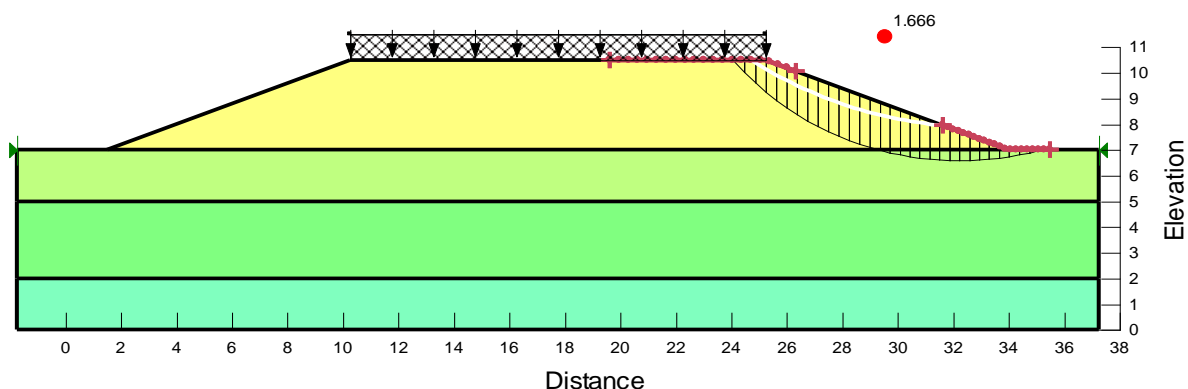
Color	Name	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)	Phi-B (°)	Cohesion (kPa)
	Gliny	19				60
	Gliny piaszczyste	17				16
	Nasyp	18	0	35	0	
	Piasek	19	0	32	0	







Rysunek 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 dla zależności (2))

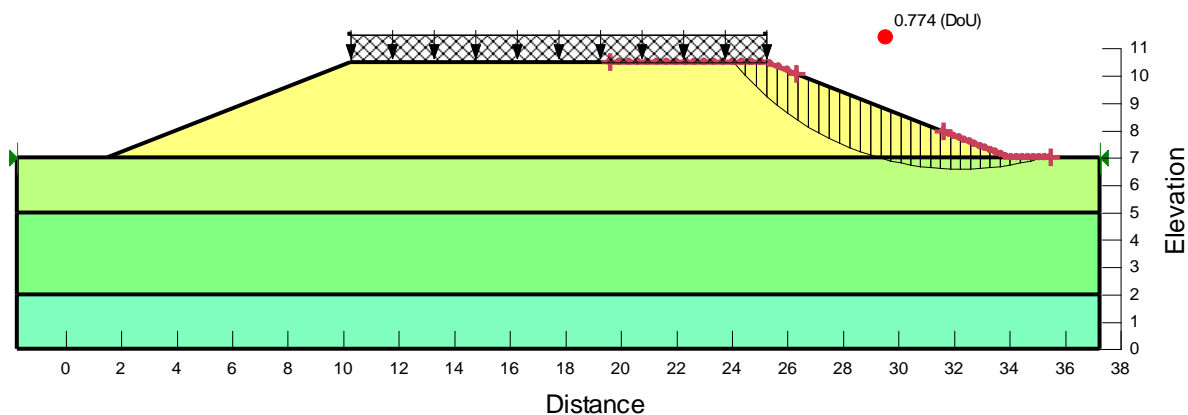
OBLICZENIA DLA WARUNKÓW DŁUGOTRWAŁYCH (WARUNKI Z ODPLYWEM)

Color	Name	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)
	Gliny	19	5	22
	Gliny piaszczyste	17	0	27
	Nasyp	18	0	35
	Piasek	19	0	32



Rysunek 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/m <sup>3</sup> )	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)
	Gliny	19	5	22
	Gliny piaszczyste	17	0	27
	Nasyp	18	0	35
	Piasek	19	0	32



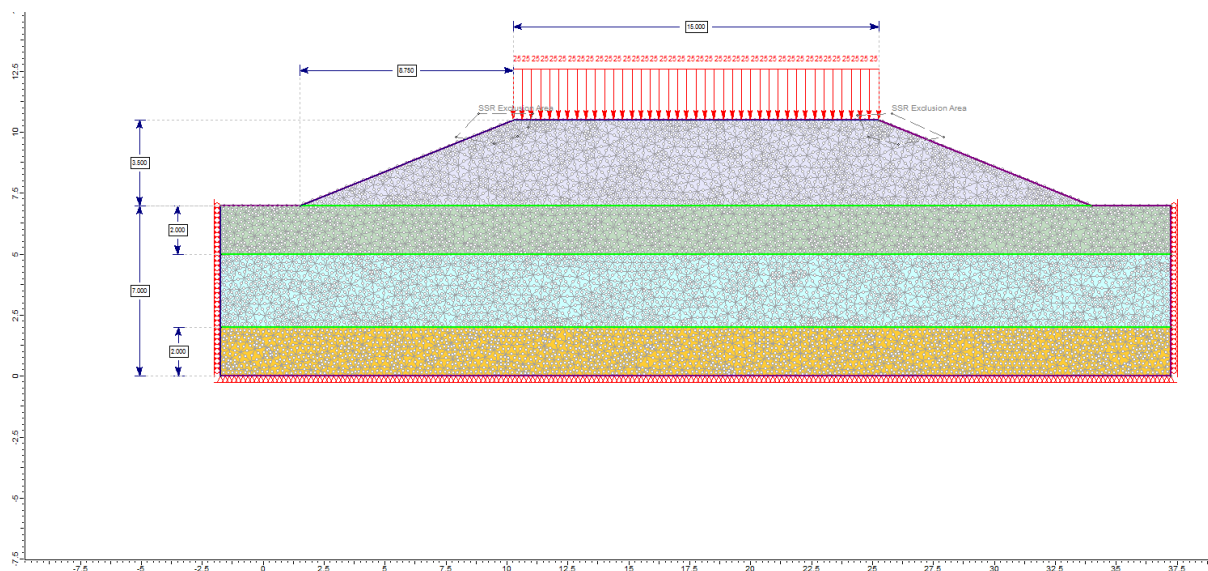
Rysunek 7.10 Zasięg powierzchni poślizgu dla wskaźnika stateczności FS=1.293 wyznaczonego metodą Bishopa przy uwzględnieniu podejścia projektowego DA3 dla warunków z odpływem. Wskaźnik wykorzystania nośności 77.4% (rozwiązanie spełnia wymogi zależności (2))

## 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 lokalne zniszczenie występujące w rejonie górnej krawędzi skarpy – obszary te zostały wyłączone z obliczeń. W tabeli (Tabela 7.7) przedstawiono wyniki obliczeń dla różnej liczby elementów przy uwzględnieniu charakterystycznych parametrów geotechnicznych. Do dalszych analiz przyjęto model z podziałem na 6 000 elementów.

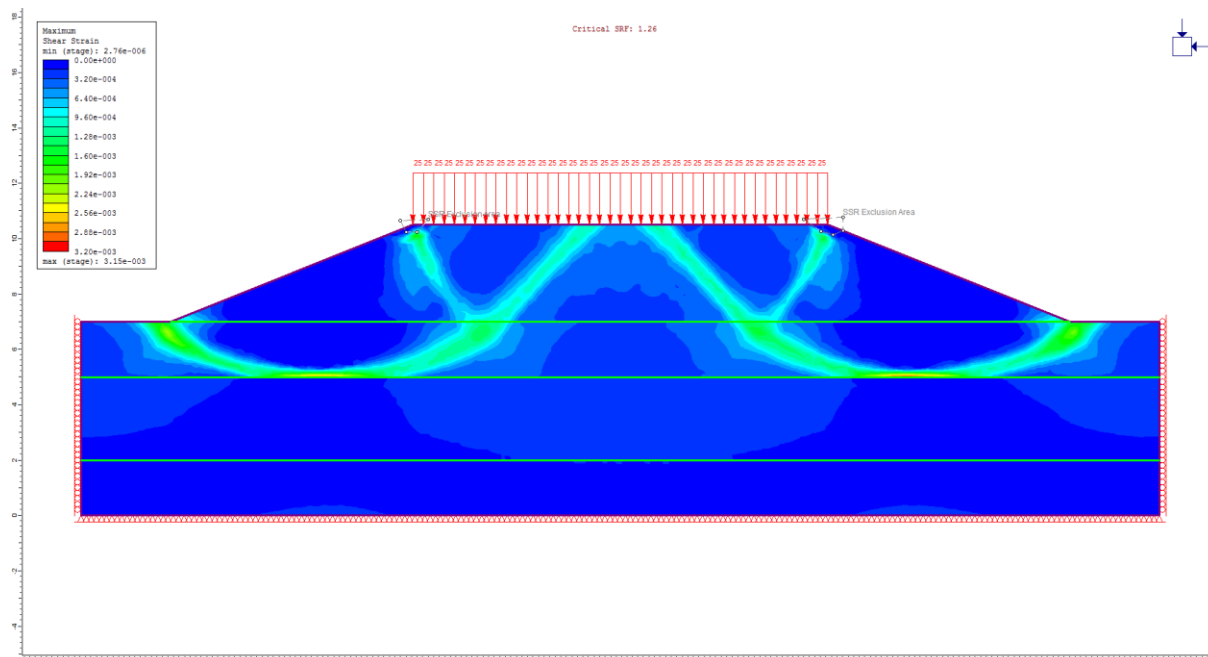
Tabela 7.7 Wartość wskaźnika stateczności w zależności od uwzględnionej liczby elementów

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

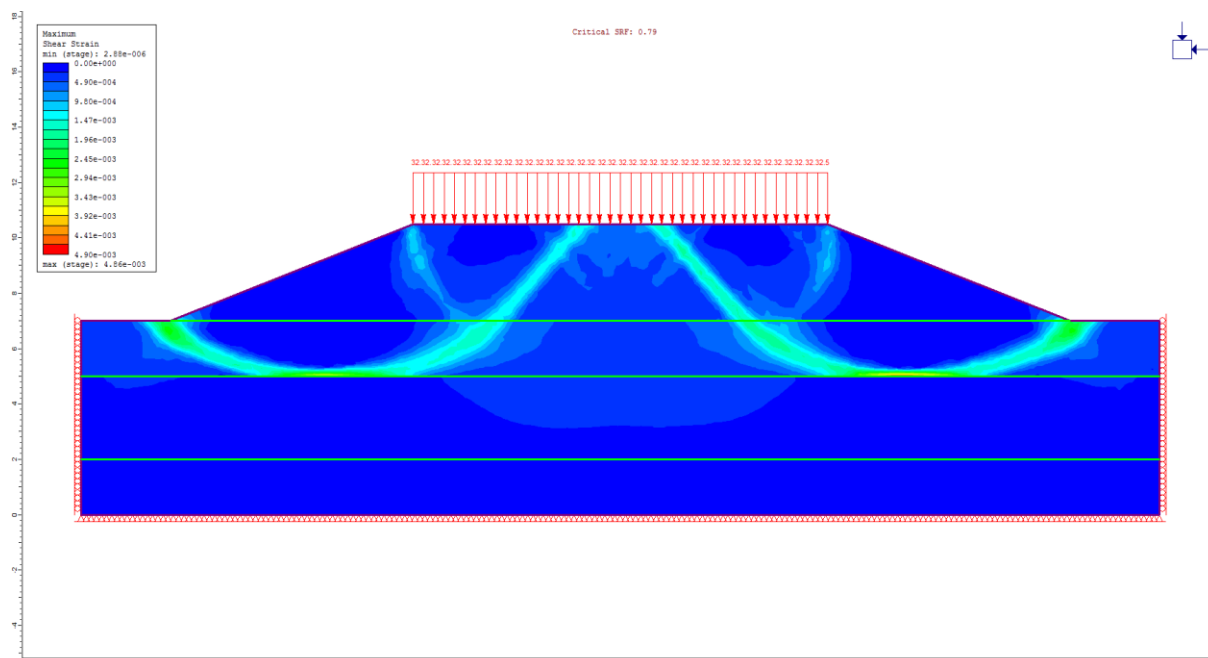


Rysunek 7.11 Model obliczeniowy

## OBLICZENIA DLA WARUNKÓW KRÓTKOTRWAŁYCH (WARUNKI BEZ ODPLYWU)

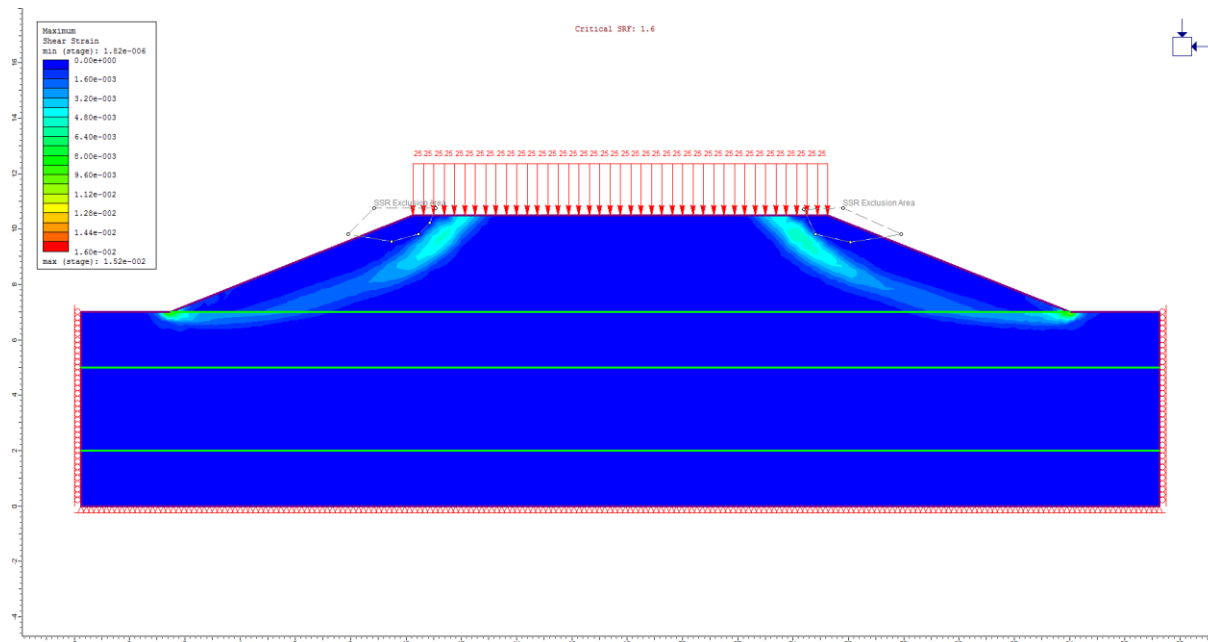


Rysunek 7.12 Zasięg powierzchni poślizgu przedstawiony na podstawie odkształceń postaciowych dla wskaźnika stateczności  $FS=1.26$  wyznaczonego na podstawie metody redukcji wytrzymałości na ścinanie dla parametrów charakterystycznych

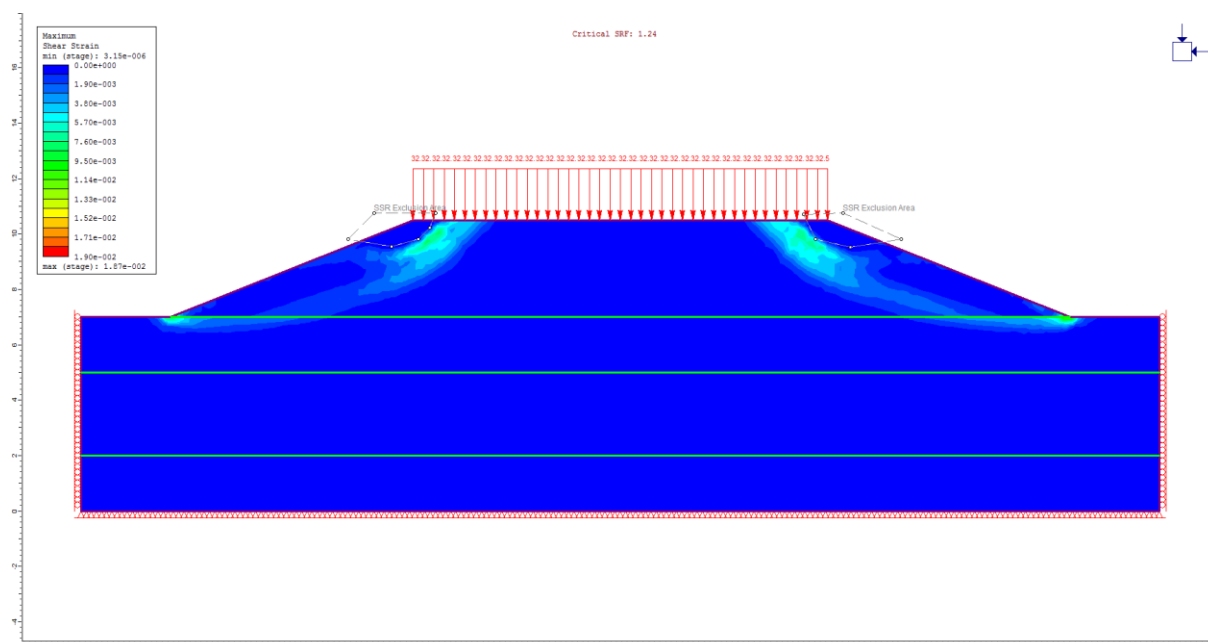


Rysunek 7.13 Zasięg powierzchni poślizgu przedstawiony na podstawie odkształceń postaciowych dla wskaźnika stateczności  $FS=0.79$  wyznaczonego na podstawie metody redukcji wytrzymałości na ścinanie, dla parametrów obliczeniowych określonych wg podejścia DA3

## OBLICZENIA DLA WARUNKÓW DŁUGOTRWAŁYCH (WARUNKI Z ODPLYWEM)



Rysunek 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



Rysunek 7.15 Zasięg powierzchni poślizgu przedstawiony na podstawie odkształceń postaciowych dla wskaźnika stateczności  $FS=1.24$  wyznaczonego na podstawie metody redukcji wytrzymałości na ścinanie, dla parametrów obliczeniowych określonych wg podejścia DA3

## Zestawienie wyników

W tabeli (Tabela 7.8) przedstawiono wyniki uzyskane dla nasypu drogowego posadowionego na słabym podłożu. Na podstawie przeprowadzonych analiz należy stwierdzić, że w warunkach krótkotrwałych, przy uwzględnieniu warunków bez odpływu, analizowana skarpa nie spełnia warunków stateczności. Dotyczy to wszystkich analizowanych założeń. Natomiast w przypadku warunków długotrwałych 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 krótkotrwałe (bez odpływu)	Wartości charakterystyczne	1.284	$FS \geq 1.5$	117	Warunek niespełniony
	Podjęcie DA3	0.881	$FS \geq 1.0$	114	Warunek niespełniony
Warunki długotrwałe (z odpływem)	Wartości charakterystyczne	1.666	$FS \geq 1.5$	90	Warunek spełniony
	Podjęcie DA3	1.293	$FS \geq 1.0$	77	Warunek spełniony
Obliczenia przy uwzględnieniu metody redukcji wytrzymałości na ścinanie					
Warunki krótkotrwałe (bez odpływu)	Wartości charakterystyczne	1.25	$FS \geq 1.5$	120	Warunek niespełniony
	Podjęcie DA3	0.79	$FS \geq 1.0$	127	Warunek niespełniony
Warunki długotrwałe (z odpływem)	Wartości charakterystyczne	1.6	$FS \geq 1.5$	94	Warunek spełniony
	Podjęcie DA3	1.24	$FS \geq 1.0$	81	Warunek spełniony

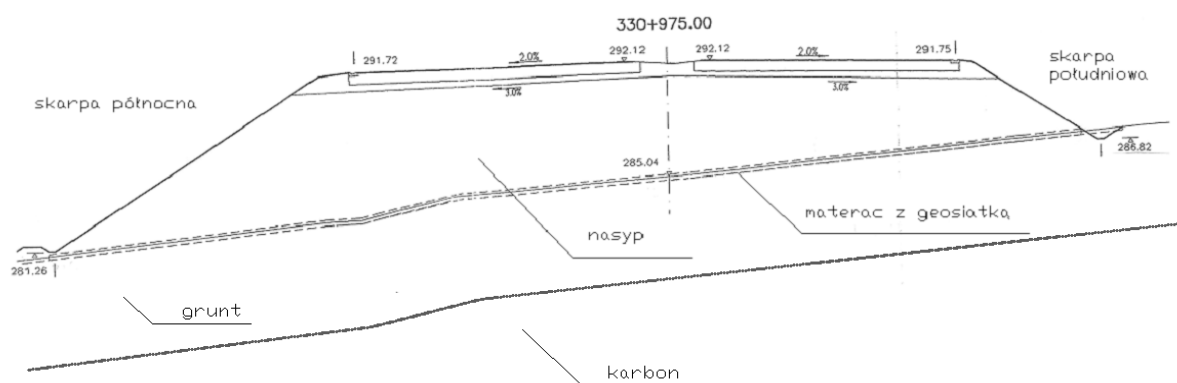
Obliczenia stateczności wykonane przy zastosowaniu metody redukcji wytrzymałości na ścinanie wykazują nieco niższe wartości wskaźników stateczności. Podobnie jak przy zastosowaniu metody równowagi granicznej, w warunkach bez odpływu we wszystkich analizowanych przypadkach stwierdzono brak spełnionych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

Dla pełnej analizy, obliczenia te należy uzupełnić o ocenę nośności pionowej oraz użyteczności w celu sprawdzenia, czy nie zostają przekroczone dopuszczalne wartości. Wskazane jest wykonanie tych analiz przed analizą stateczności.

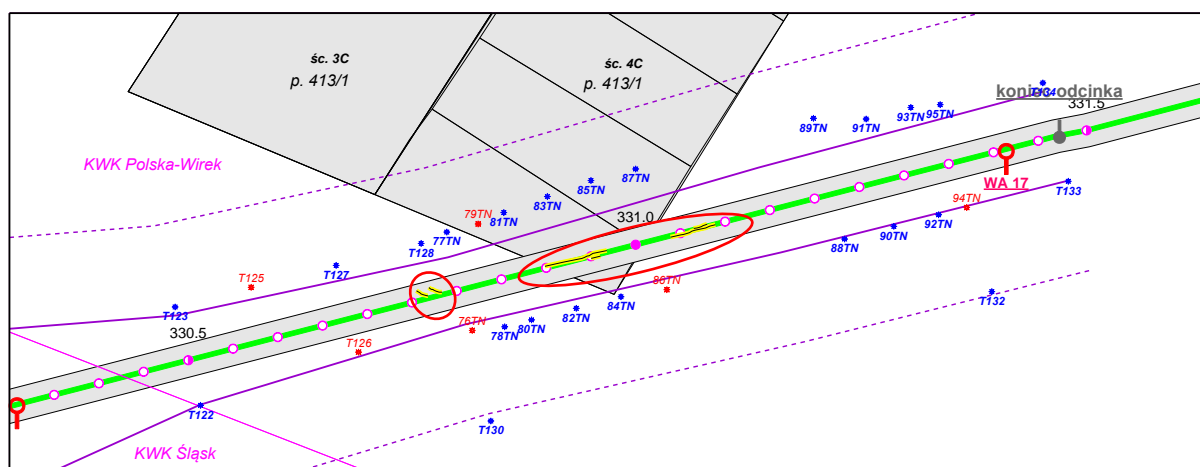
## Przykład 4

W przykładzie 4 przedstawiono przestrzenną analizę wybranego zagadnienia geotechnicznego w skomplikowanych warunkach gruntowych (Cała i in., 2006a,b). 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 (Rysunek 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 (Rysunek 7.17). We wrześniu 2004 r. stwierdzono stan awaryjny nasypu autostrady na odcinku w rejonie km 330.900 skutkujący m. in. powstaniem spękań o rozwartości do kilku cm oraz głębokości do dwóch metrów (Rysunek 7.17 i Rysunek 7.18).



Rysunek 7.16 Przekrój przez analizowany nasyp



Rysunek 7.17 Położenie krawędzi ścian 3C i 4C w stosunku do analizowanego odcinka autostrady A-4 oraz zaznaczone miejsca uszkodzeń nasypu (czerwone elipsy)





Rysunek 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 twar doplastycznej, poniżej których zlokalizowane są skalne utwory karbonu. Parametry fizyko-mechaniczne poszczególnych warstw przyjęte w obliczeniach zestawiono w tabeli (Tabela 7.9).

Tabela 7.9 Parametry fizyko-mechaniczne warstw przyjęte w obliczeniach

Warstwa	Ciężar objętościowy $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Moduł Younga E [MPa]	Współczynnik Poissona $\nu$ [-]	Kohezja c [kPa]	Kąt tarcia wewnętrznego $\phi$ [°]
Nasyp	20.0	60	0.25	18.0	25.0
Materac z żużla wielkopieczowego	16.0	60	0.25	60.79	45.8
Grunt	20.7	30	0.25	15.0	14.0
Skała	25.0	5000	0.30	1000	35.0

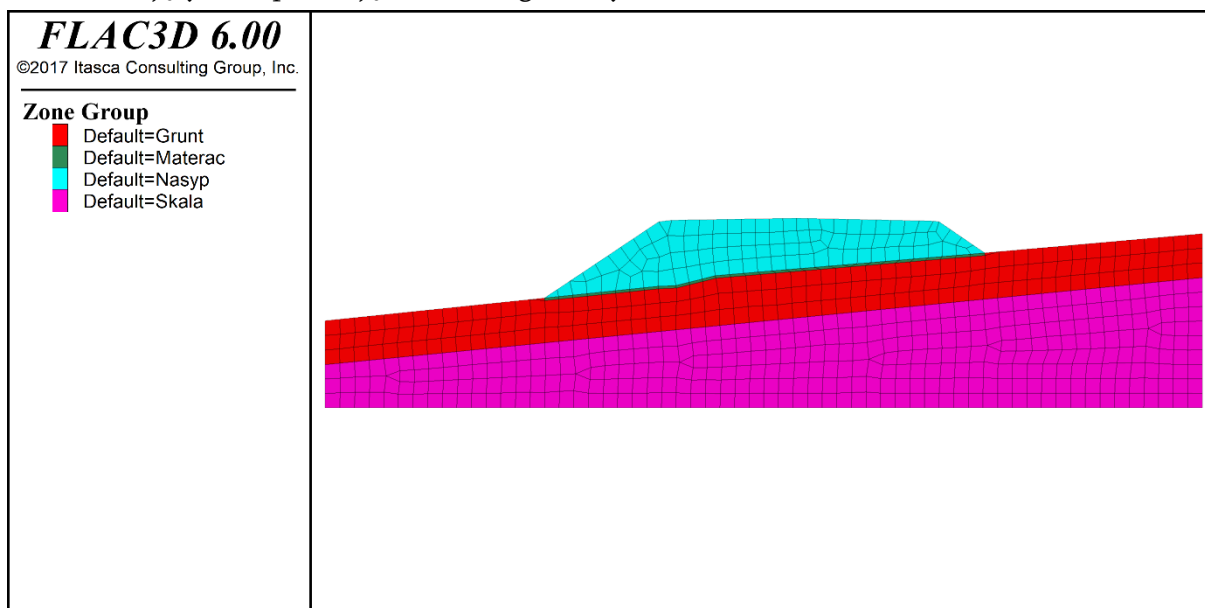
Do obliczeń przyjęto model przedstawiony na rysunkach (Rysunek 7.19 i Rysunek 7.20), o szerokości podstawy równej 120 m, wysokości podłoża z lewej strony 11.9 m, z prawej strony 23.8 m i długości nasypu równej 1000 m. Wysokość skarpy północnej (lewa strona modelu) wynosi 10.4 m, a skarpy południowej (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 ściany 4C). Na rysunku (Rysunek 7.21) przedstawiono mapę naprężeń pionowych, natomiast rysunek (Rysunek 7.22) przedstawia mapę naprężeń poziomych.

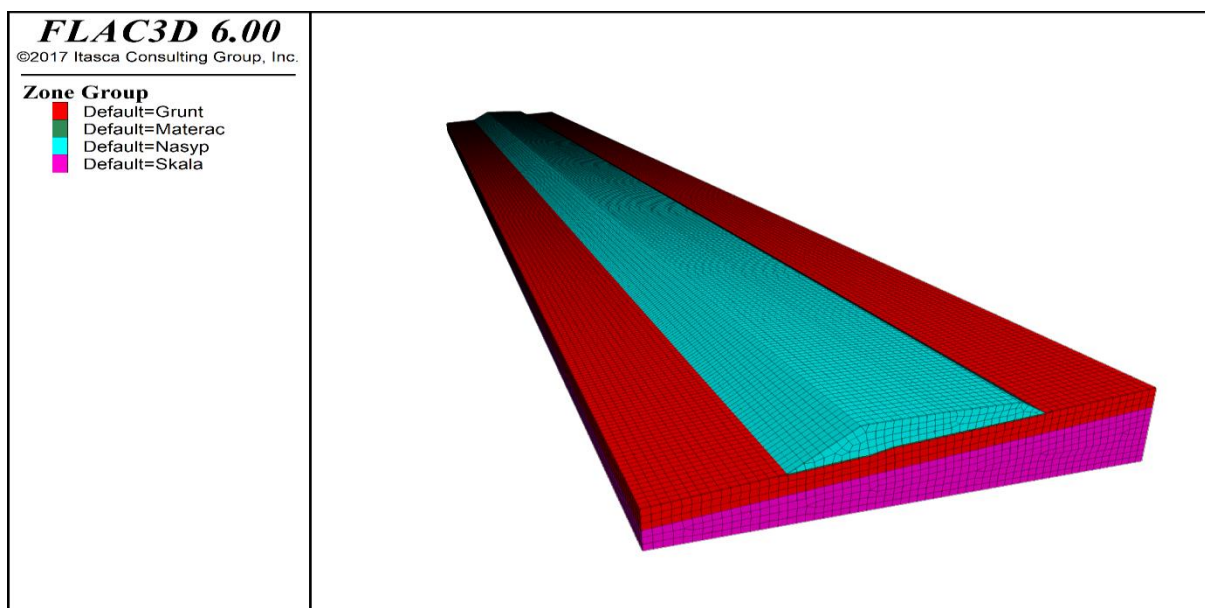


Aby przeprowadzić analizę wpływu deformacji górniczych na nasyp niezbędne jest przyjęcie w modelu numerycznym odpowiednich warunków brzegowych. W tym celu przeprowadzono obliczenia wg teorii Budryka-Knothego uzyskując mapy osiadań, nachyleń, odkształceń i przemieszczeń poziomych. Przykładową mapę dla nachyleń całkowitych przedstawiono na rysunku (Rysunek 7.23).

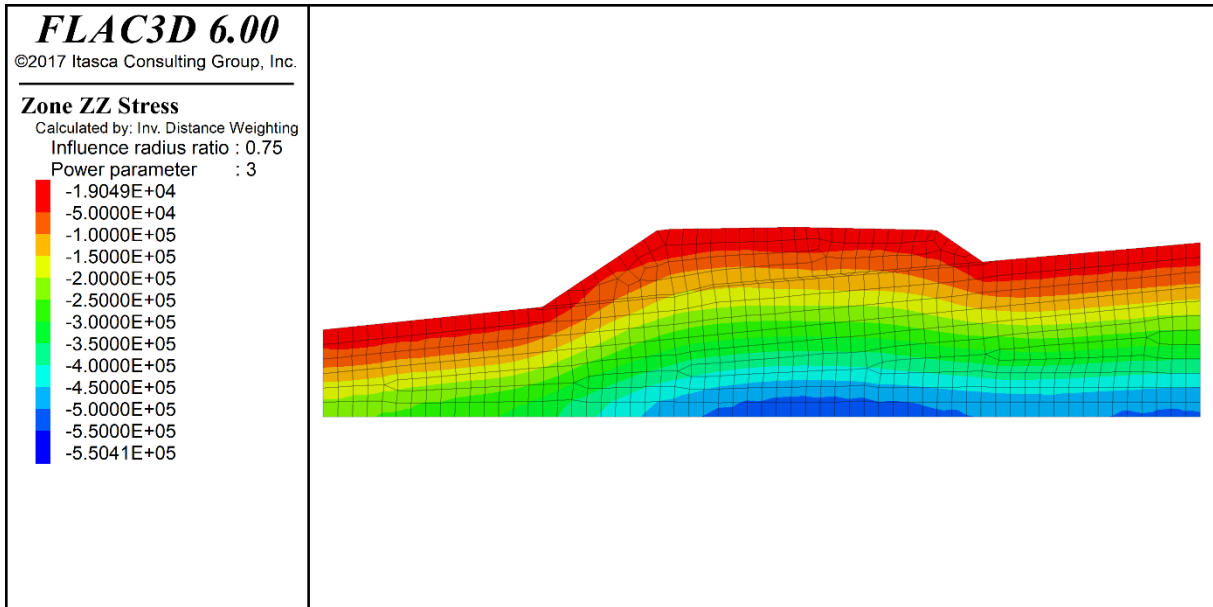
W kolejnym etapie – wykorzystując wbudowany w program FLAC3D wewnętrzny język programowania FISH – napisano procedurę która na podstawie map deformacji powierzchni (mapa osiadań i mapa przemieszczeń poziomych) uzyskanych z hipotezy Budryka-Knothego, zakłada w węzłach modelu numerycznego jako warunki brzegowe odpowiednie wartości prędkości na krok obliczeniowy (Rysunek 7.24 i Rysunek 7.25). Po wykonaniu określonej liczby kroków uzyskuje się w efekcie sytuację, w której model nasypu poddawany jest deformacjom odwzorowującym eksploatację na terenie górniczym.



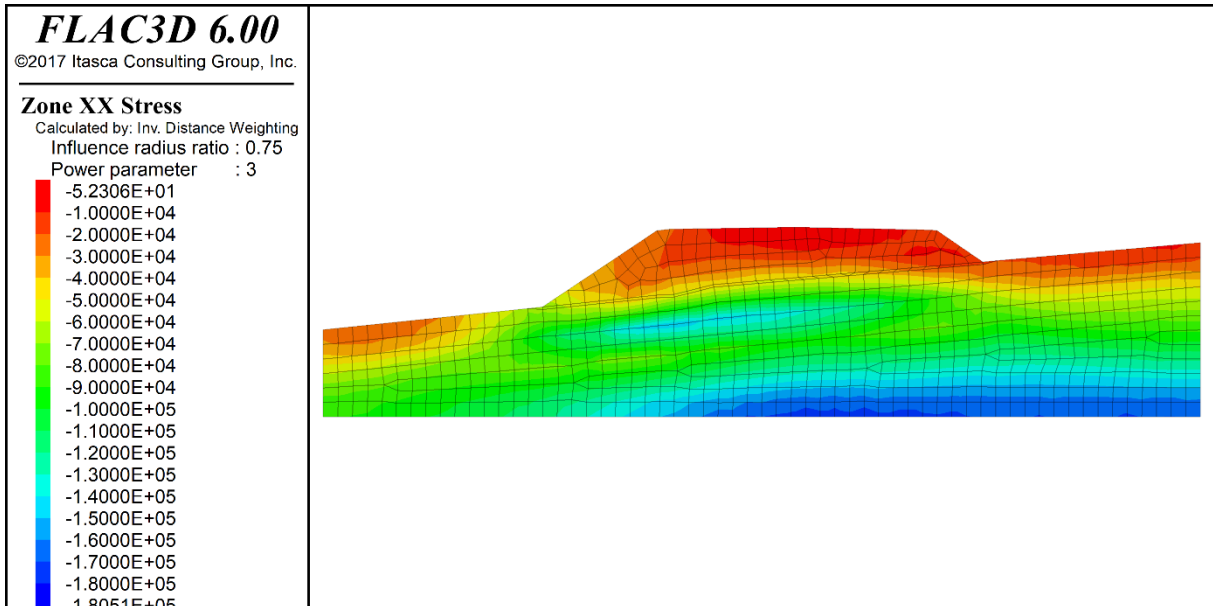
Rysunek 7.19 Przekrój przez model nasypu przyjęty do obliczeń



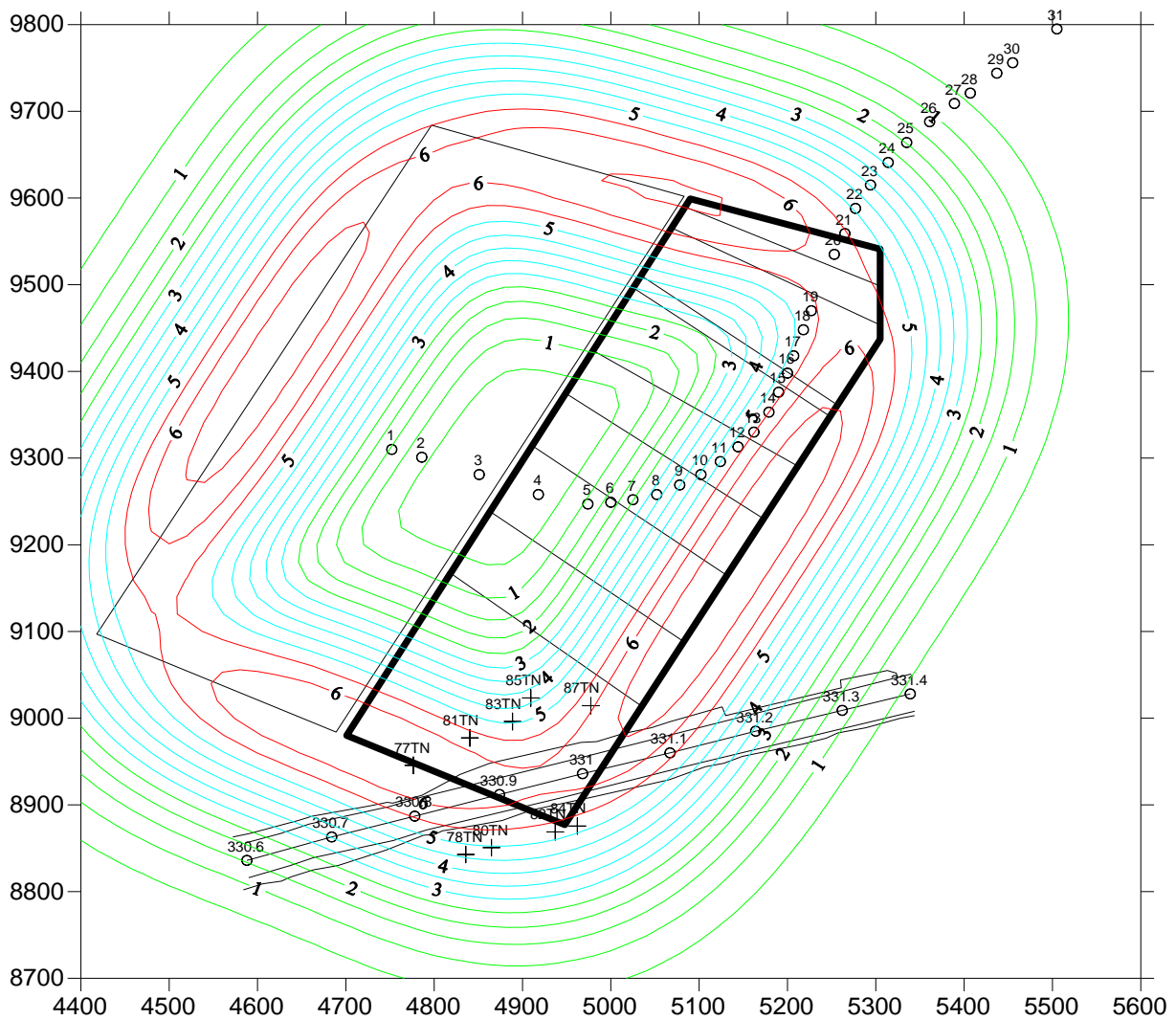
Rysunek 7.20 Model nasypu przyjęty do obliczeń



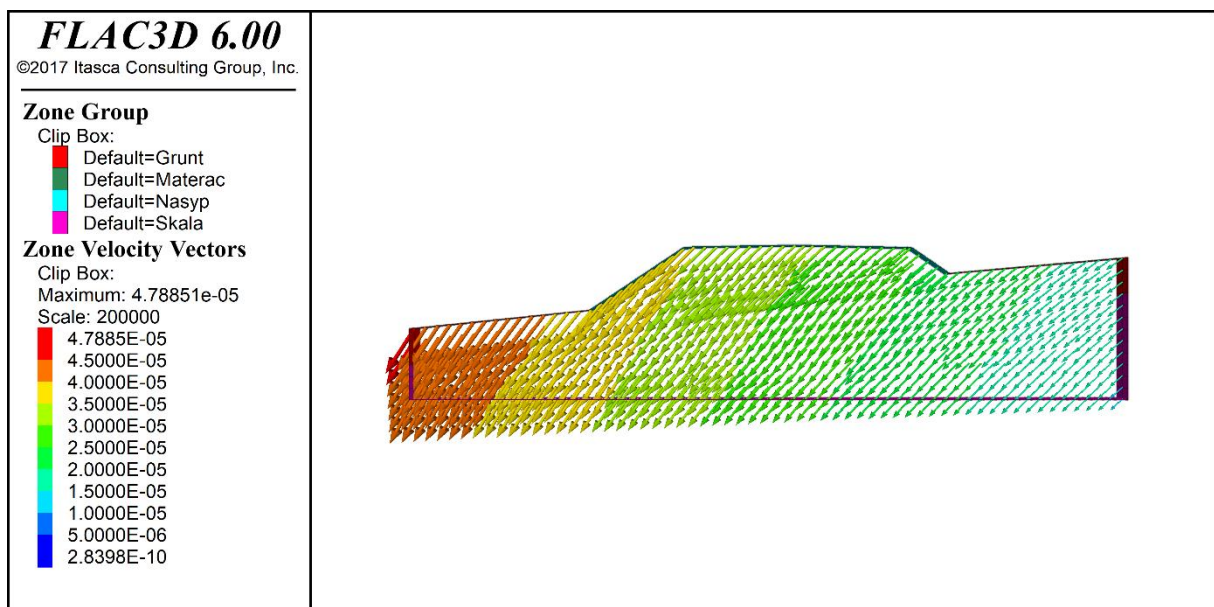
Rysunek 7.21 Mapa naprężeń pionowych w nasypie przed eksploatacją ściany 4C



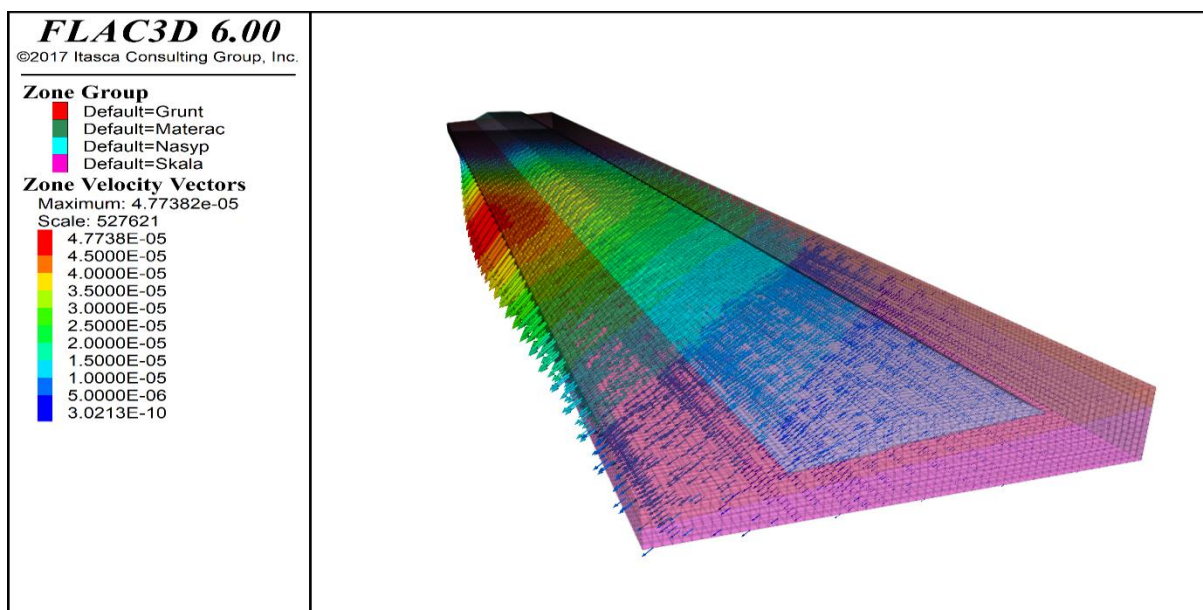
Rysunek 7.22 Mapa naprężeń poziomych w nasypie przed eksploatacją ściany 4C



Rysunek 7.23 Wyniki obliczeń nachyleń całkowitych współczynnika eksploatacji  $a=0.9$



Rysunek 7.24 Warunki brzegowe i początkowe przyjęte w postaci wektorów prędkości (w przekroju)



Rysunek 7.25 Warunki brzegowe i początkowe przyjęte w postaci wektorów prędkości (widok ogólny)

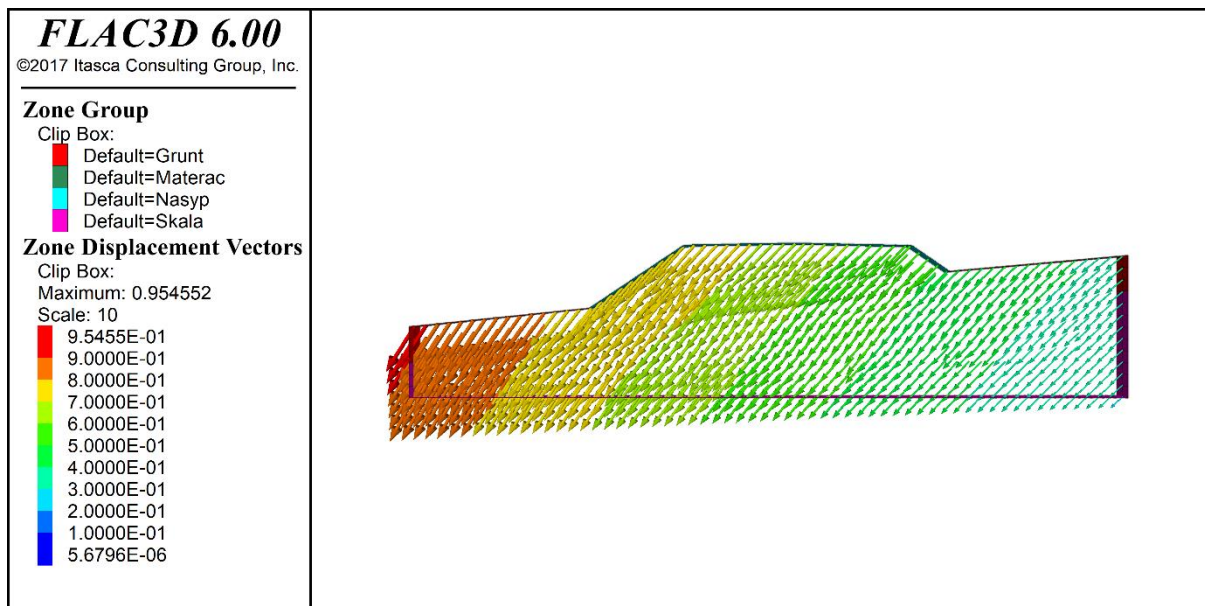
### Wyniki obliczeń

Na rysunkach (Rysunek 7.26 - Rysunek 7.31) 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 7.26 przedstawia wektory przemieszczeń w przekroju przez nasyp dla założonych deformacji wywołanych eksploatacją ściany 4C, z kolei rysunek (Rysunek 7.27) 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-Knothe'go uzyskano znaczne wartości odkształceń poziomych w koronie nasypu w kierunku prostopadłym do nasypu (czarne elipsy - Rysunek 7.28) – 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 (Rysunek 7.29). Odkształcenia postaciowe są jednym z symptomów utraty stateczności przez skarpy nasypów bądź wykopów.

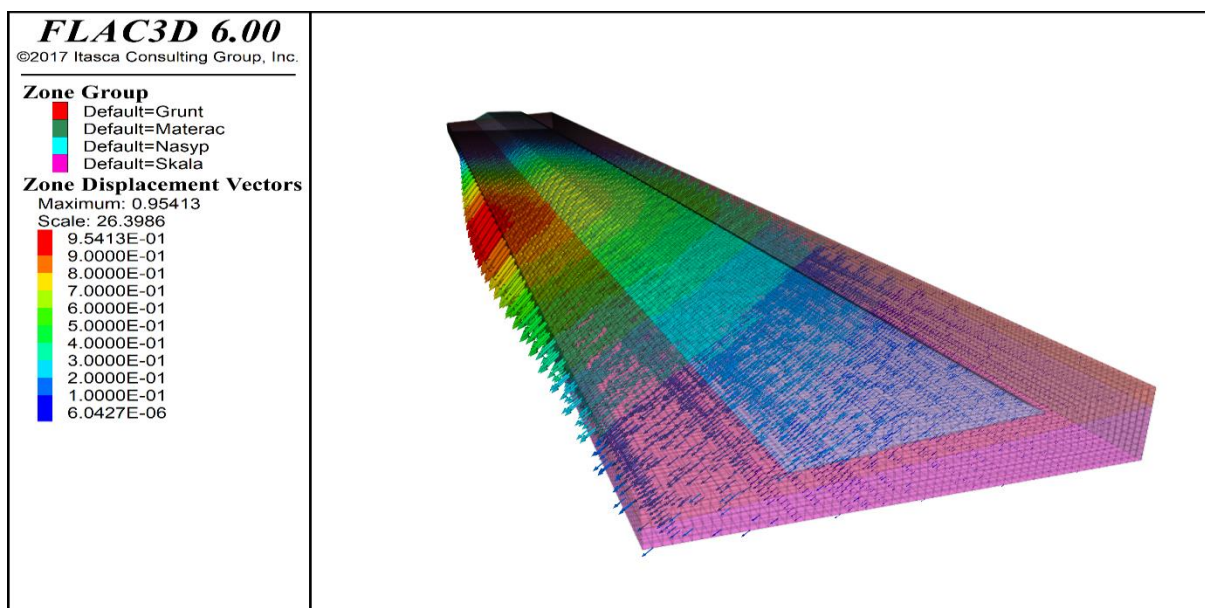
Analizując lokalizację koncentracji odkształceń na rysunkach (Rysunek 7.28 i Rysunek 7.29) można stwierdzić, że są one nieco oddalone od naroża ściany 4C wchodzącego pod nasyp, i nie do końca odpowiadają lokalizacji szczelin zaobserwowanych w rzeczywistości (Rysunek 7.17). Przyczyną tego może być fakt, 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 (Rysunek 7.30 i Rysunek 7.31). Rysunek 7.30 przedstawia mapę odkształceń poziomych w koronie nasypu, w kierunku prostopadłym do nasypu. Maksymalne wartości odkształceń na skutek eksploatacji, są podobnie jak w poprzednim wariantcie istotnie większe od wartości na powierzchni terenu (o ok. 60%), natomiast ich lokalizacja jest w pełni zgodna z rzeczywistością zaobserwowanymi szczelinami. Analizując mapę maksymalnych odkształceń postaciowych również można stwierdzić znaczne koncentracje



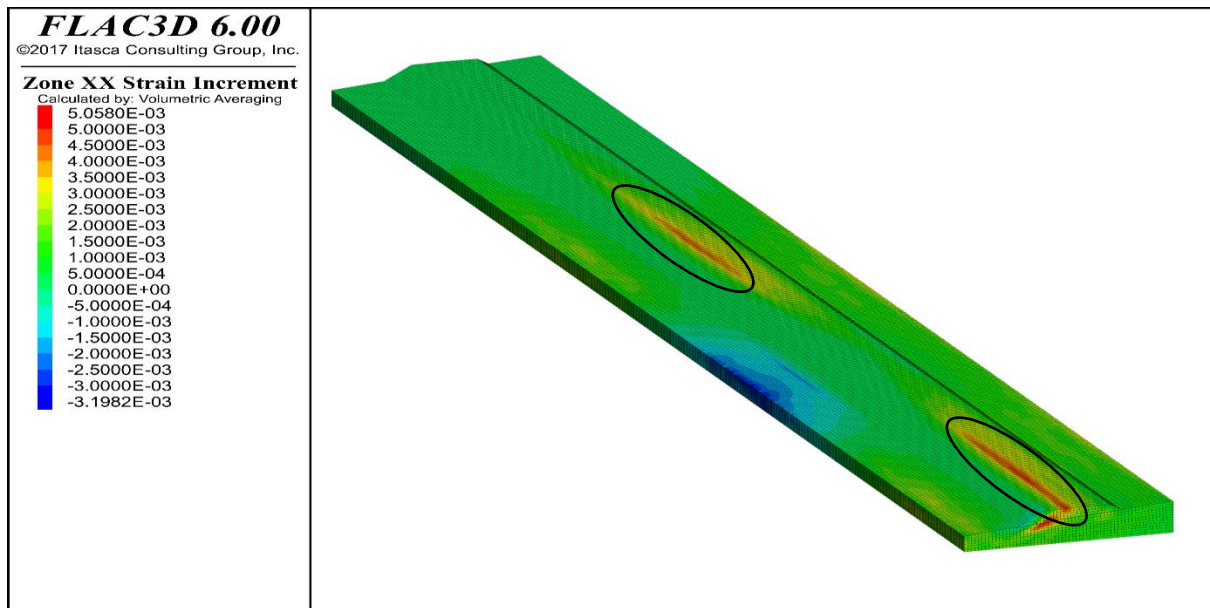
odkształceń w miejscach wystąpienia szczelin.



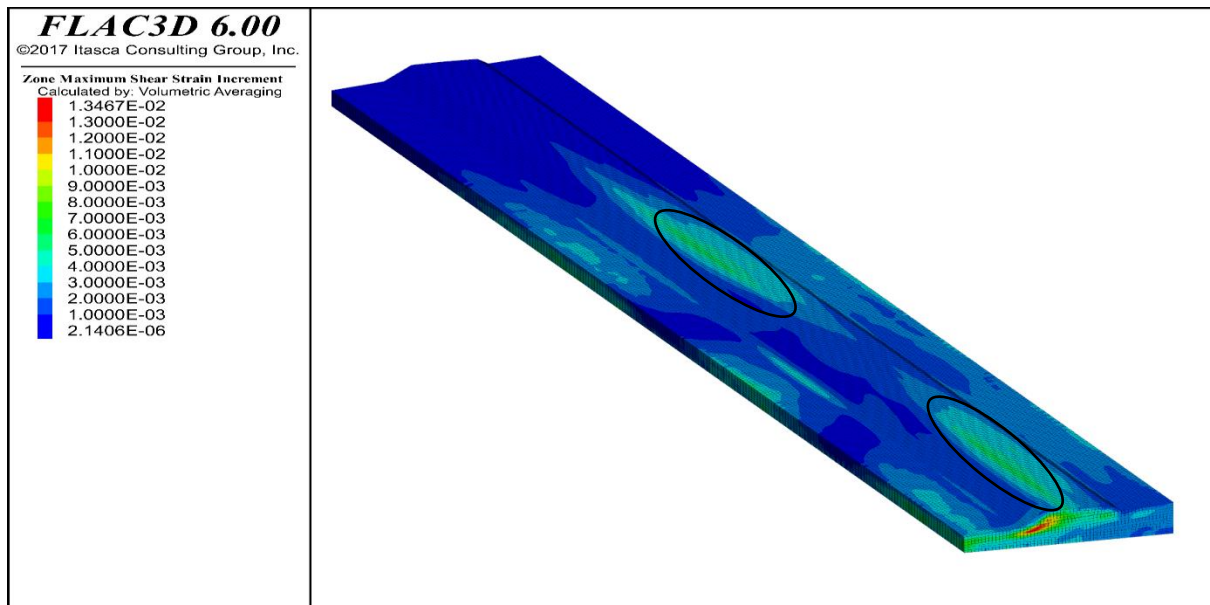
Rysunek 7.26 Wektory przemieszczeń po wyeksploatowaniu ściany 4C (w przekroju)



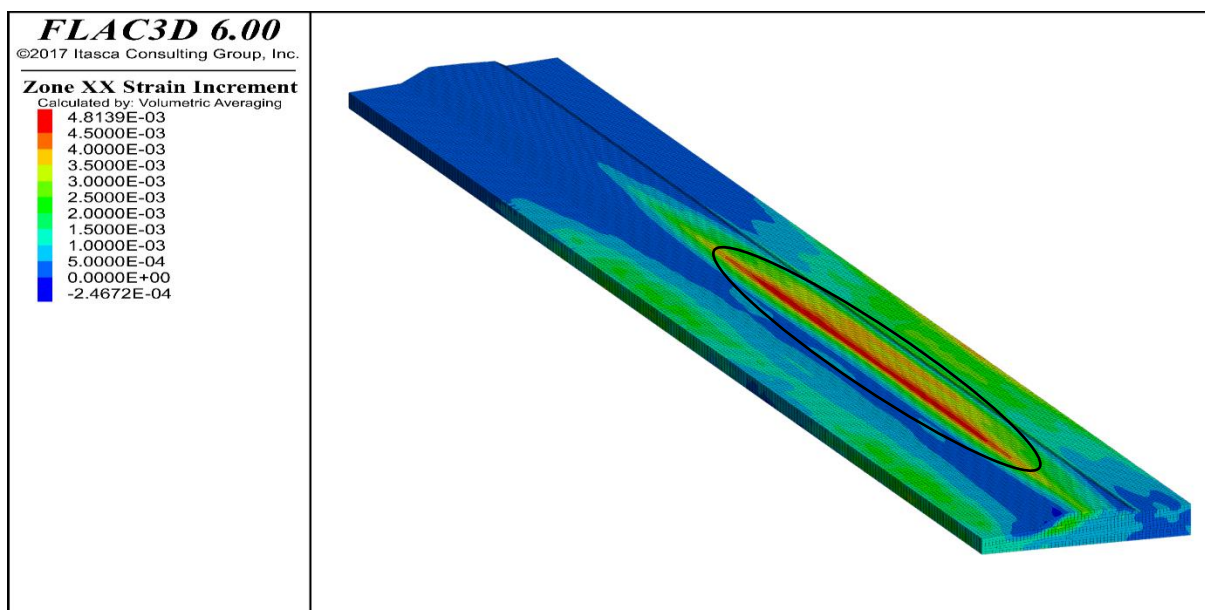
Rysunek 7.27 Wektory przemieszczeń po wyeksploatowaniu ściany 4C (widok ogólny)



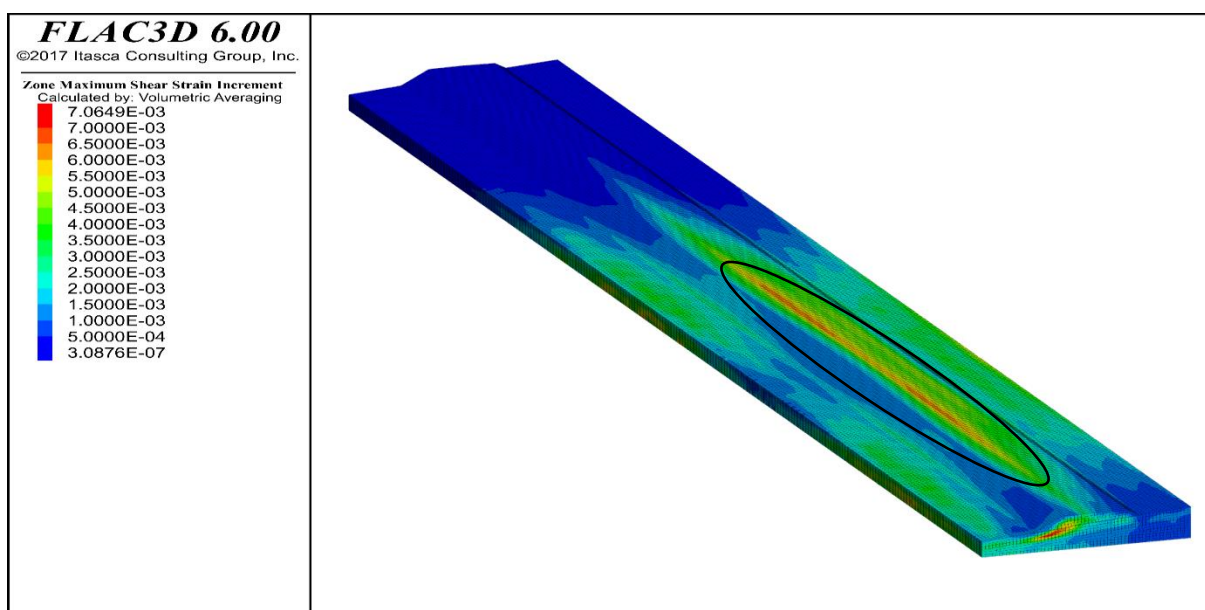
Rysunek 7.28 Mapa odkształceń poziomych w kierunku prostopadłym do osi nasypu (po wyeksploatowaniu ściany 4C)



Rysunek 7.29 Mapa maksymalnych odkształceń postaciowych (po wyeksploatowaniu ściany 4C)



Rysunek 7.30 Mapa odkształceń poziomych w kierunku prostopadłym do osi nasypu (60 m do pełnego wyeksploatowania ściany 4C)



Rysunek 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-Knothe'go 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 wykopy 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.



Fot. 4503 – okolice przyszłego Obwodu Utrzymania Drogi S17 w Dysie,  
widok w kierunku węzła Lublin Czechów. GDDKiA



## NOWOCZESNE METODY ROZPOZNANIA PODŁOŻA GRUNTOWEGO W DROGOWNICTWIE

Konsorcjum:



Państwowy Instytut Geologiczny  
Państwowy Instytut Badawczy



Akademia Górniczo-Hutnicza  
im. Stanisława Staszica w Krakowie



Politechnika Warszawska

Projekt „Nowoczesne metody rozpoznania podłoża gruntowego w drogownictwie” finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju oraz Skarb Państwa - Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad w ramach Wspólnego Przedsięwzięcia RID.

