

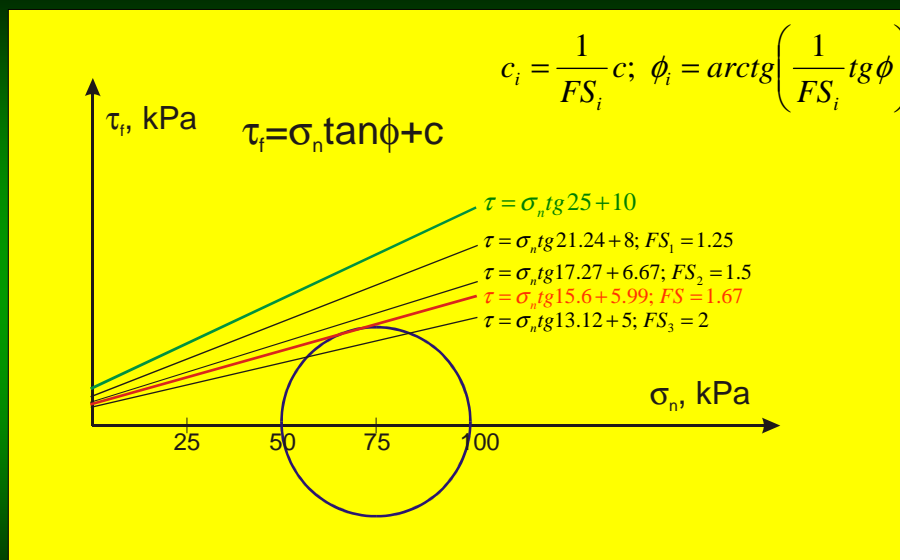
Możliwości zastosowania metod numerycznych dla analizy stateczności skarp i zboczy



Marek Cała, Jerzy Flisiak

Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH

Metoda redukcji wytrzymałości na ścinanie



Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH

Stateczność skarp i zboczy

- do chwili obecnej nie uzyskano **rozwiązania analitycznego**, opisującego rozkład naprężeń w skarpie, nawet dla najprostszych, najbardziej wyidealizowanych modeli,
- poszczególne indywidualne przypadki można rozwiązywać stosując **metody numeryczne**

METODA STOPNIOWEJ REDUKCJI WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCINANIE

- c, ϕ , parametry wytrzymałościowe materiału budującego zbocze
- c_i, ϕ_i , zredukowane parametry wytrzymałościowe materiału budującego zbocze

$$c_i = \frac{1}{FS_i} c$$
$$\phi_i = \arctg\left(\frac{tg\phi}{FS_i}\right)$$

Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH

Metodyka określania wskaźnika stateczności zbocza za pomocą programu MRS FLAC

1. Budowa geometrii modelu i przeliczenie stanu naprężenia, przemieszczenia i wyteżenia dla **zawyżonych, w stosunku do rzeczywistych, parametrów wytrzymałościowych górotworu**. Krok ten stanowi bazę do dalszych obliczeń iteracyjnych.
2. Po wyzerowaniu wartości przemieszczeń poszczególnym materiałom przypisuje się ich **rzeczywiste własności wytrzymałościowe** i ponownie przelicza model.
3. Jeżeli wyniki wskazują, że **zbocze jest stateczne ($FS > 1$)**, to stopniowo zmniejsza się parametry wytrzymałościowe, aż do uzyskania utraty stateczności zbocza.
4. Jeżeli zaś wyniki wskazują na **utratę stateczności zbocza ($FS < 1$)** to parametry wytrzymałościowe zbocza należy zwiększyć aż do wartości przy których zbocze jest stateczne.

Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH

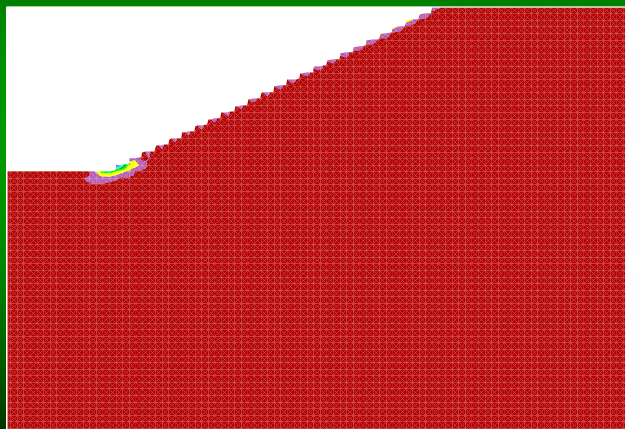
Zalety numerycznych metod określania wskaźnika stateczności zbocza

- ✓ nie wymagają przyjęcia założenia o **kształcie lokalizacji powierzchni zniszczenia**,
- ✓ **utrata stateczności zbocza odbywa się niejako naturalnie**, w tych strefach, gdzie przekroczona została wytrzymałość na ścinanie gruntu,
- ✓ nie wymagają one także **podziału potencjalnej bryły osuwiskowej na paski (bloki)** oraz określania wartości sił na ich ściankach,
- ✓ ich zastosowanie pozwala również na **obserwacje rozwoju procesu zniszczenia zbocza**.

Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH

Symptomy numerycznej utraty stateczności zbocza 1. Rozkład odkształceń postaciowych

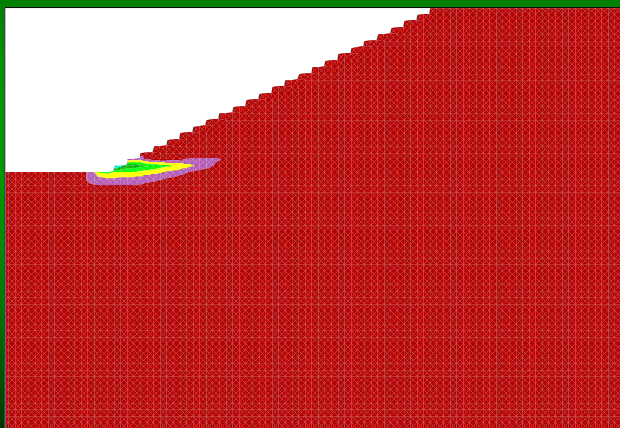
Stan początkowy



Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH

Symptomy numerycznej utraty stateczności zbocza
1. Rozkład odkształceń postaciowych

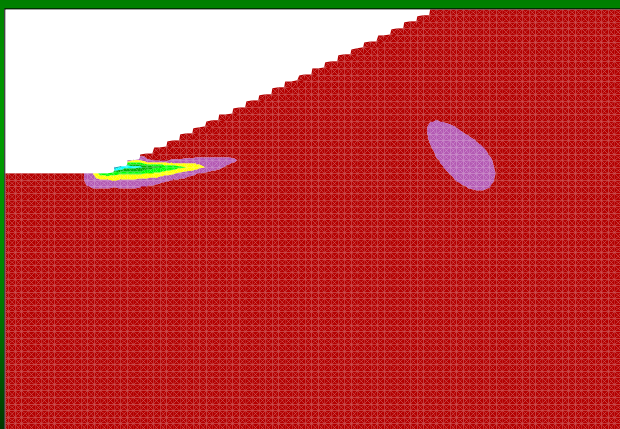
1.35



Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH

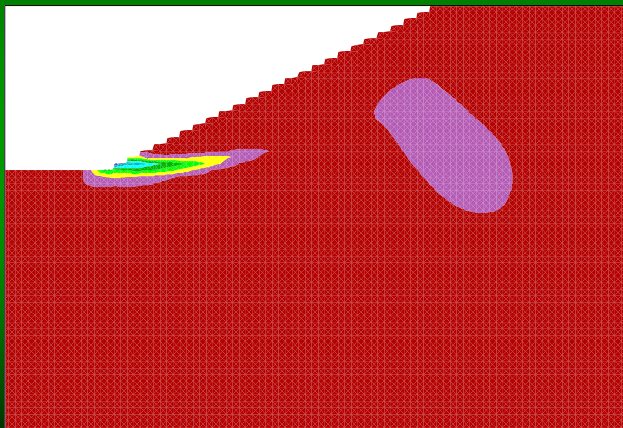
Symptomy numerycznej utraty stateczności zbocza
1. Rozkład odkształceń postaciowych

1.37



Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH

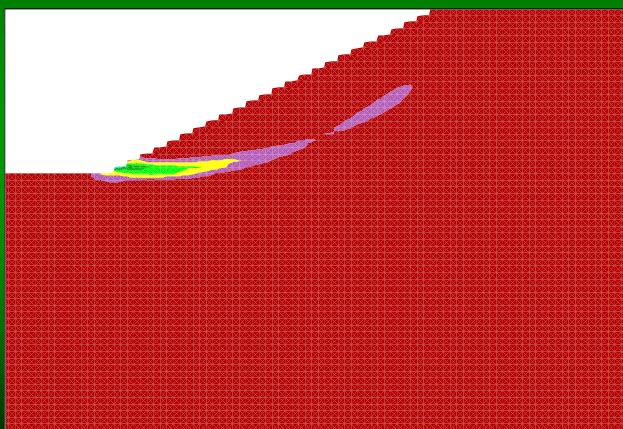
Symptomy numerycznej utraty stateczności zbocza
1. Rozkład odkształceń postaciowych



1.39

Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH

Symptomy numerycznej utraty stateczności zbocza
1. Rozkład odkształceń postaciowych

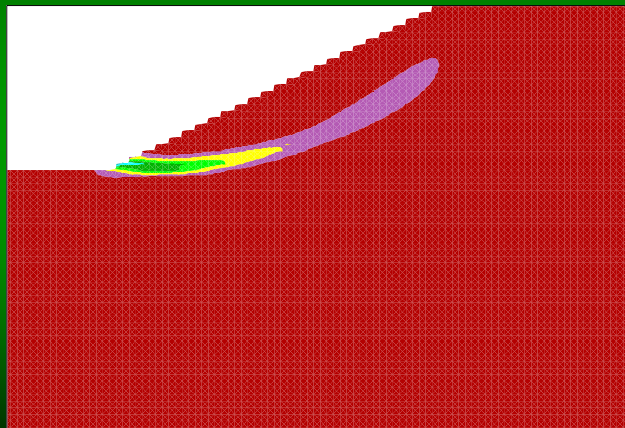


1.41

Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH

Symptomy numerycznej utraty stateczności zbocza
1. Rozkład odkształceń postaciowych

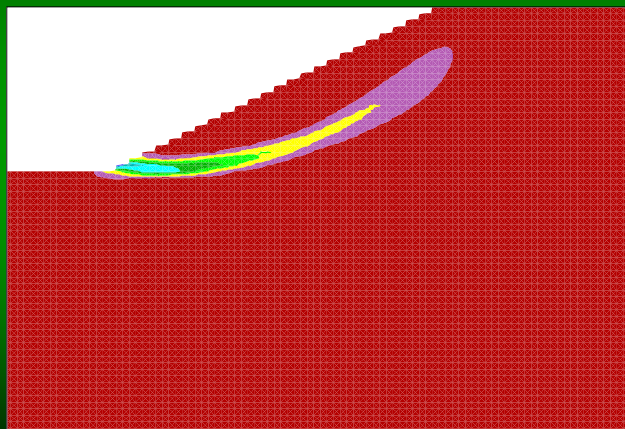
1.43



Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH

Symptomy numerycznej utraty stateczności zbocza
1. Rozkład odkształceń postaciowych

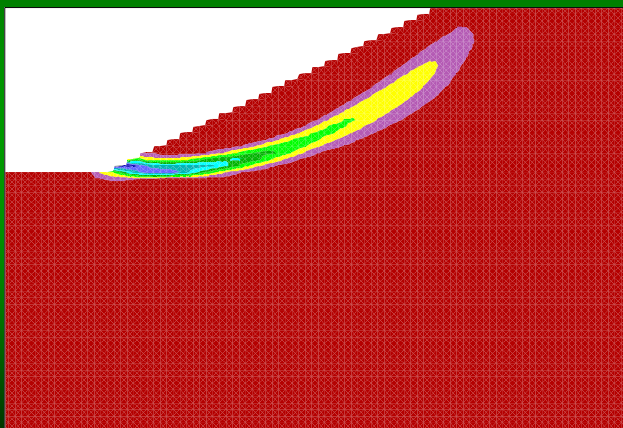
1.44



Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH

Symptomy numerycznej utraty stateczności zbocza
1. Rozkład odkształceń postaciowych

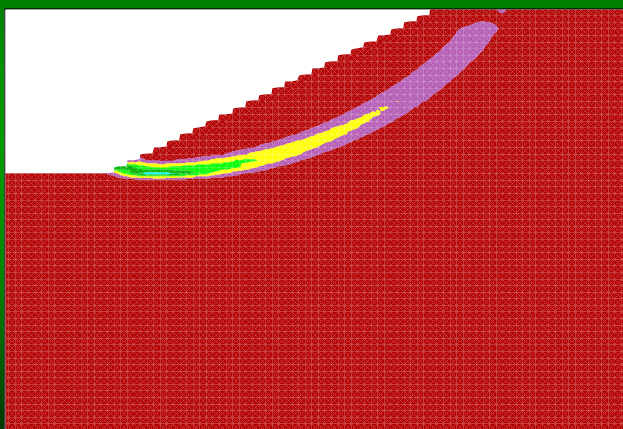
1.45



Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH

Symptomy numerycznej utraty stateczności zbocza
1. Rozkład odkształceń postaciowych

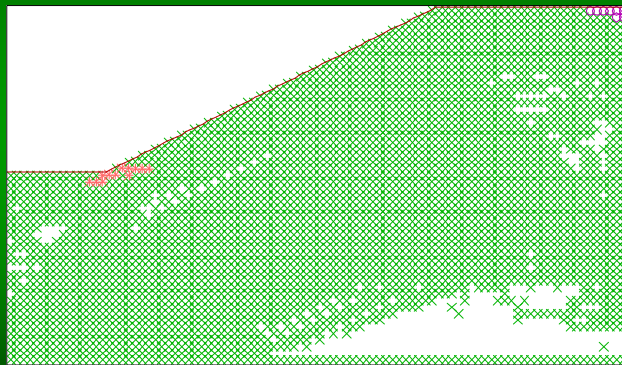
1.46



Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH

Symptomy numerycznej utraty stateczności zbocza 2. Rozkład wskaźników uplastycznienia

Stan
początkowy

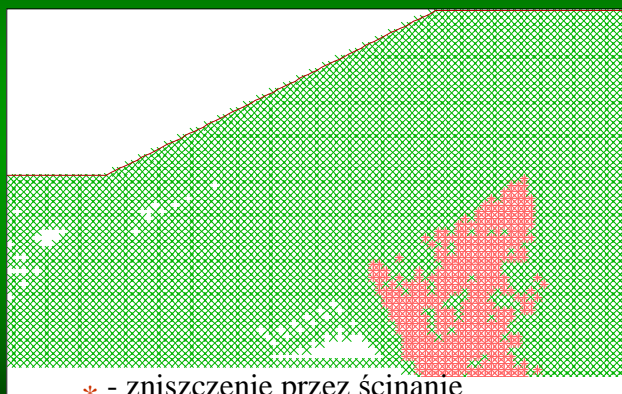


* - zniszczenie przez ścinanie
○ - zniszczenie przez rozciąganie

Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH

Symptomy numerycznej utraty stateczności zbocza 2. Rozkład wskaźników uplastycznienia

1.45

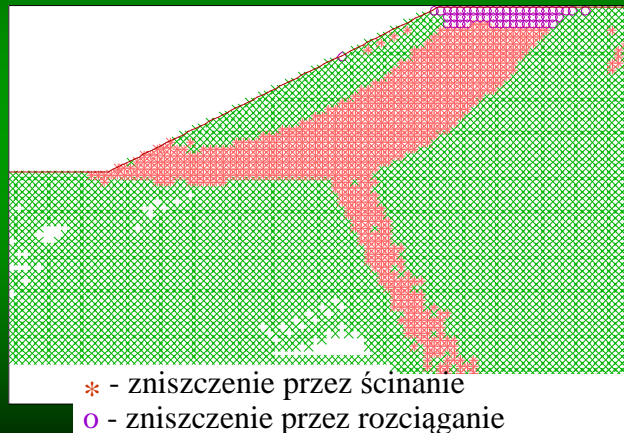


* - zniszczenie przez ścinanie
○ - zniszczenie przez rozciąganie

Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH

Symptomy numerycznej utraty stateczności zbocza 2. Rozkład wskaźników uplastycznienia

1.46

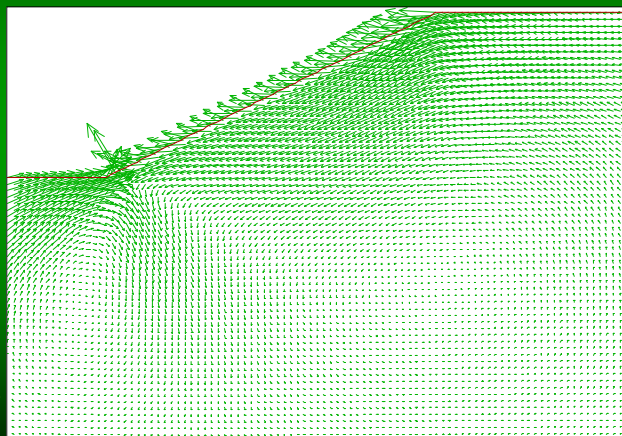


Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH

Symptomy numerycznej utraty stateczności zbocza 3. Anomalny wzrost przemieszczeń

$d_{\max} = 0.32 \text{ cm}$

Stan początkowy

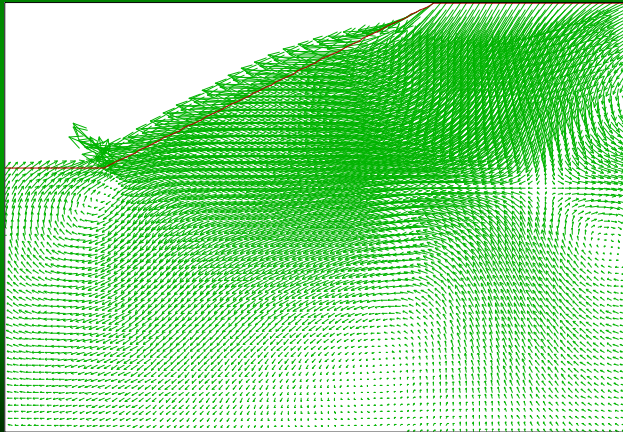


Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH

Symptomy numerycznej utraty stateczności zbocza
3. Anomalny wzrost przemieszczeń

$d_{\max} = 0.64 \text{ cm}$

1.2

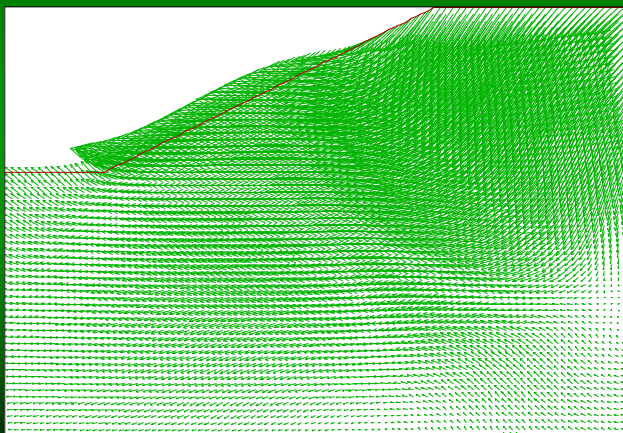


Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH

Symptomy numerycznej utraty stateczności zbocza
3. Anomalny wzrost przemieszczeń

$d_{\max} = 4.6 \text{ cm}$

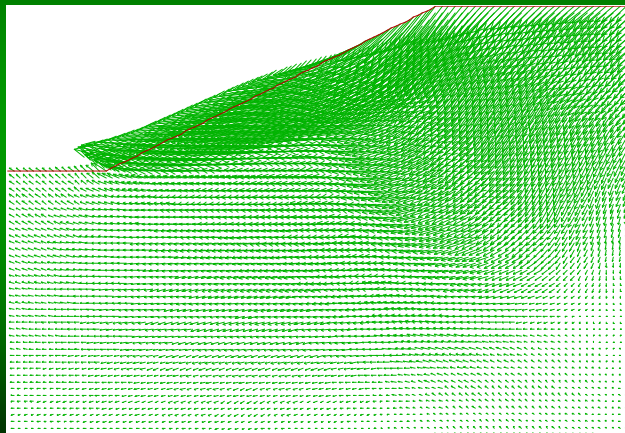
1.4



Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH

Symptomy numerycznej utraty stateczności zbocza
3. Anomalny wzrost przemieszczeń

$d_{\max} = 10.7 \text{ cm}$

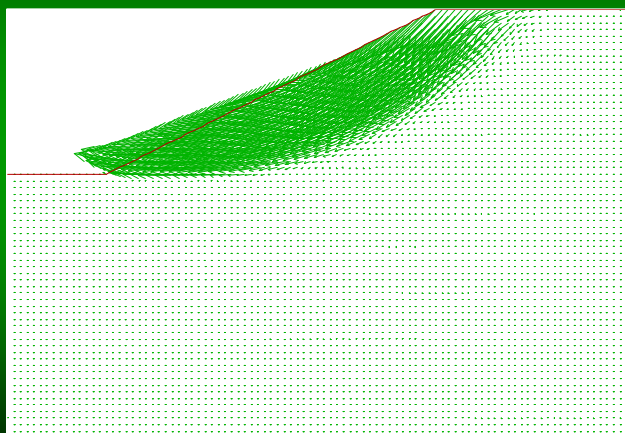


1.45

Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH

Symptomy numerycznej utraty stateczności zbocza
3. Anomalny wzrost przemieszczeń

$FS=1.46$

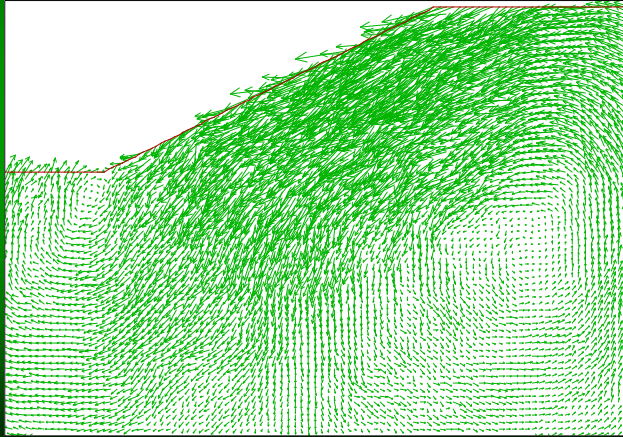


Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH

Symptomy numerycznej utraty stateczności zbocza 4. Wzrost prędkości przemieszczeń

$v_{\max} = 1.08E-7$ m/s

Stan
początkowy

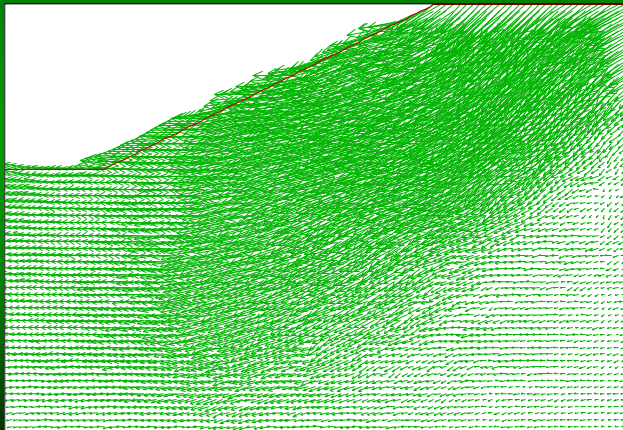


Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH

Symptomy numerycznej utraty stateczności zbocza 4. Wzrost prędkości przemieszczeń

$v_{\max} = 1.62E-7$ m/s

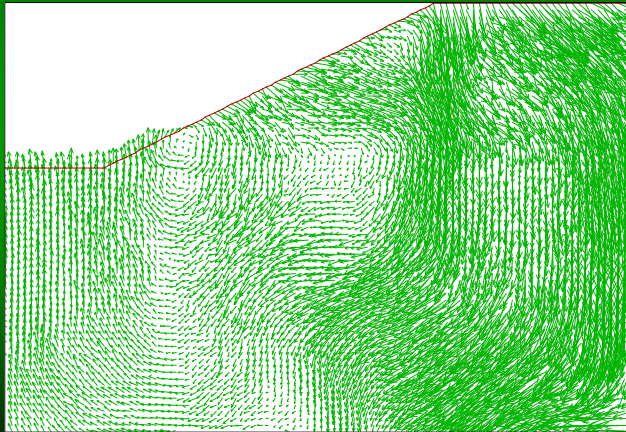
1.2



Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH

Symptomy numerycznej utraty stateczności zbocza
4. Wzrost prędkości przemieszczeń

$v_{\max} = 9.91E-8$ m/s

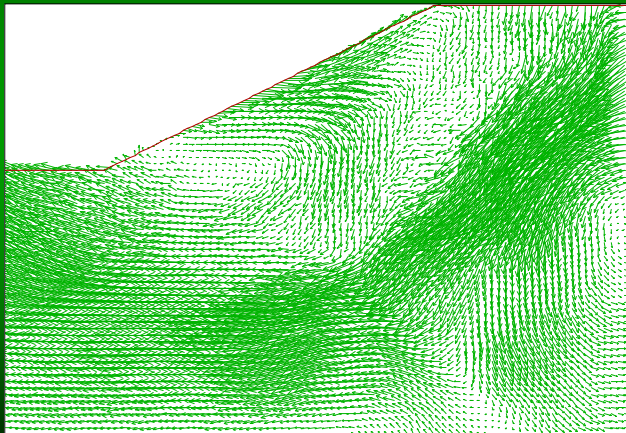


1.4

Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH

Symptomy numerycznej utraty stateczności zbocza
4. Wzrost prędkości przemieszczeń

$v_{\max} = 1.75E-7$ m/s

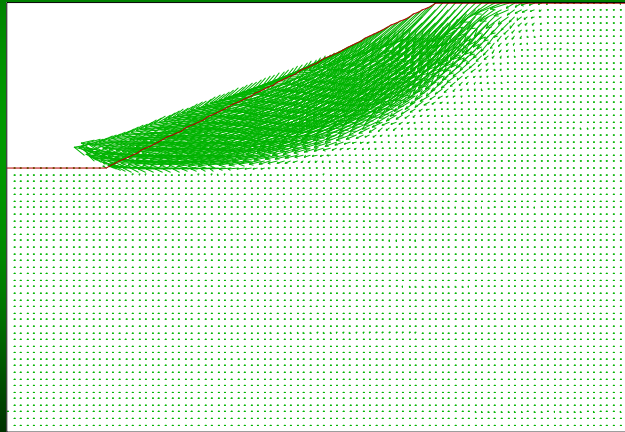


1.45

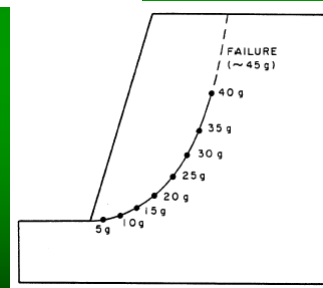
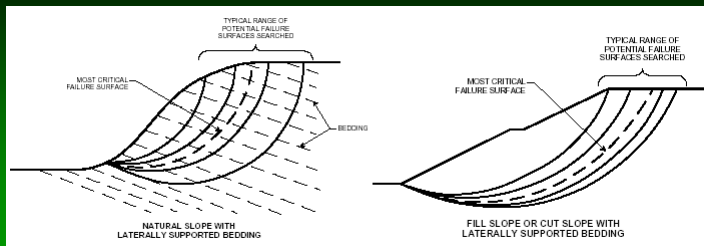
Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH

Symptomy numerycznej utraty stateczności zbocza 4. Wzrost prędkości przemieszczeń

FS=1.46



Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH



Postulated centrifuge slope failure mechanism showing propagation of failure surface from toe to crest with increasing gravitational acceleration

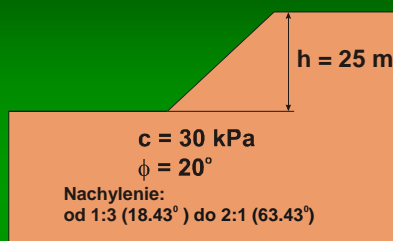
Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH

Wpływ własności odkształceniowych na wskaźnik stateczności zbocza

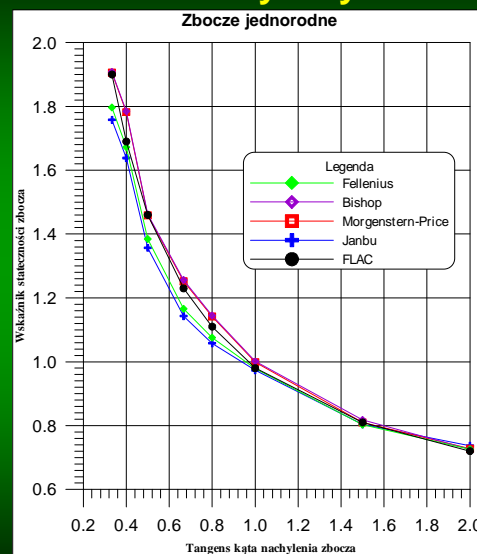
- ✓ przeprowadzono wariantowe obliczenia dla zbocza o nachyleniu 45° zmieniając wartości modułu Younga (w zakresie od 25 MPa do 1000 MPa) oraz liczby Poissona (w zakresie od 0.1 do 0.4).
- ✓ Wyniki obliczeń wskazują jednoznacznie, że **parametry odkształceniowe nie mają wpływu na wartość wskaźnika stateczności** - różnica 1 %.
- ✓ Griffiths D.V., Lane P.A. (1999) wręcz **zalecają** stosowanie do wszystkich analiz modułu Younga równego **100 MPa** i liczby Poissona równej **0.3**.

Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH

Porównanie wartości wskaźników stateczności zbocza otrzymanych z obliczeń MRG i numerycznych

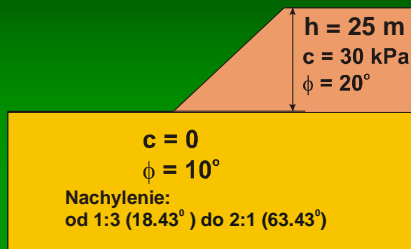


Zbocze jednorodne

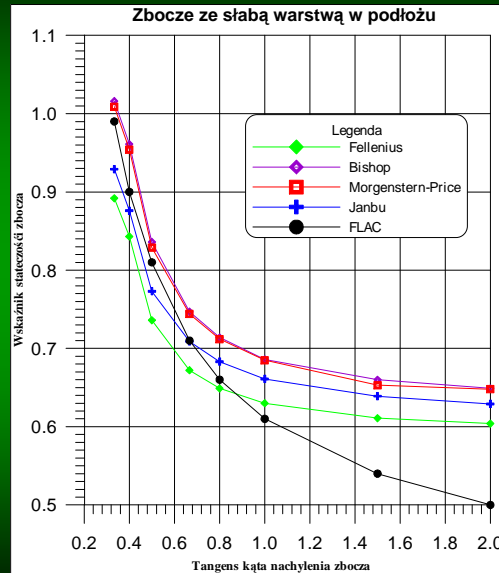


Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH

Porównanie wartości wskaźników stateczności zbocza otrzymanych z obliczeń MRG i numerycznych

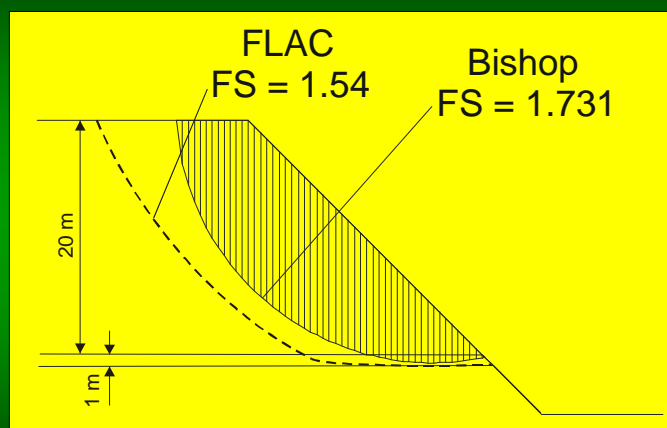


Zbocze ze słabą warstwą w podłożu



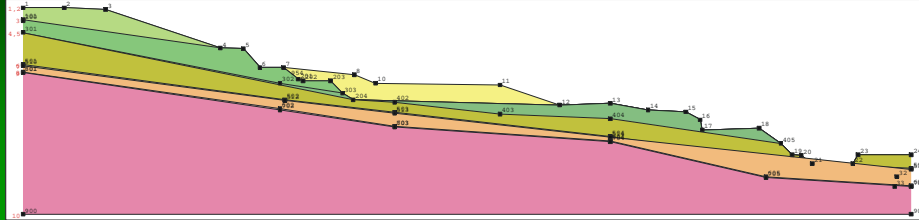
Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH

Analiza stateczności rzeczywistego zbocza o złożonej geometrii i budowie geologicznej



Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH

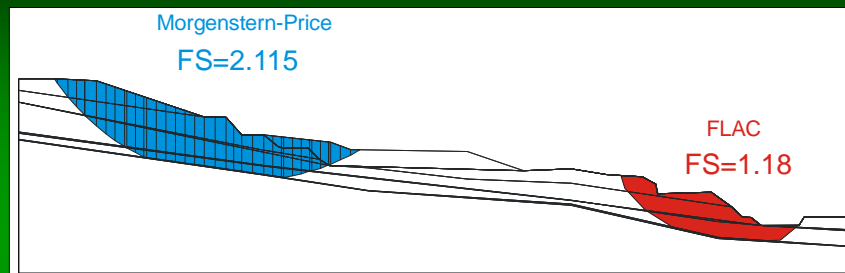
Analiza stateczności rzeczywistego zbrocza o skomplikowanej geometrii i budowie geologicznej



- wysokość - **170 m**
- generalny kąt nachylenia - **10.38°**
- skomplikowana budowa geologiczna (9 warstw litologicznych)
- model numeryczny składał się z **164344** węzłów

Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH

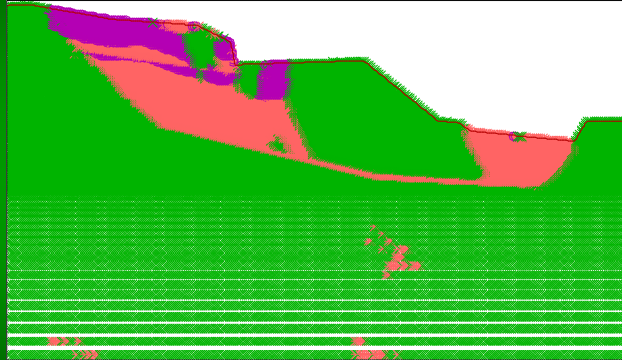
Analiza stateczności rzeczywistego zbrocza o skomplikowanej geometrii i budowie geologicznej



- Metody równowagi granicznej dają wysokie wartości wskaźnika stateczności, Fellenius - 1.873; Morgenstern-Price - 2.115 oraz lokalizowały krytyczną powierzchnię poślizgu po lewej stronie zbrocza, w jego górnej części
- FLAC – wskaźnik stateczności – 1.18 i krytyczna powierzchnia poślizgu po prawej stronie zbrocza w dolnej jego części

Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH

Analiza stateczności rzeczywistego zbocza o skomplikowanej geometrii i budowie geologicznej



* - zniszczenie przez ścinanie
o - zniszczenie przez rozciąganie

Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH

Podsumowanie

- Lane P.A., Griffiths D.V. Finite element slope stability analysis – **Why are engineers still drawing circles?** Numerical Models in Geomechanics. 1997.
- Metody numeryczne wydają się być interesującą alternatywą dla metod równowagi granicznej w zakresie określania stateczności skarp i zboczy. Najczęściej stosuje się **metodę redukcji wytrzymałości na ścinanie**.
- Istotną przeszkodą w szerokim stosowaniu metod numerycznych jest niewystarczająca praktyczna weryfikacja w warunkach rzeczywistych.
- Metody numeryczne dają wartości wskaźników stateczności zbliżone do otrzymanych z metod równowagi granicznej dla skarp charakteryzujących się stosunkowo **prostą geometrią** i budową litologiczną.

Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH

Podsumowanie i wnioski

- Analizy skarp o skomplikowanej budowie wskazują na istnienie pewnych **rozbieżności pomiędzy metodami równowagi granicznej i metodami numerycznymi**, które mogą rosnąć w miarę stopnia skomplikowania rozpatrywanej sytuacji.
- Klasyczna metoda redukcji wytrzymałości na ścinanie pozwala na wykrycie „najsłabszego ogniwa” w skarpie. Może to być niewystarczające dla pełnej analizy stateczności skarpy.
- **Metoda różnic skończonych pozwala na zastosowanie zmodyfikowanej procedury redukcji wytrzymałości na ścinanie, co umożliwia pełną analizę możliwości utraty stateczności dowolnej skarpy.**

Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH