



Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Modelování v geotechnice – Modelování stability svahových těles
(prezentace pro výuku předmětu Modelování v geotechnice)

doc. RNDr. Eva Hrubešová, Ph.D.



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Inovace studijního oboru Geotechnika CZ.1.07/2.2.00/28.0009.

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem ČR.

NEJČASTĚJI POUŽÍVANÉ METODY MODELOVÁNÍ STABILITY SVAHOVÝCH TĚLES

Metody mezní rovnováhy - základem je předpoklad silové popř. momentové rovnováhy části svahu nad uvažovanou smykovou plochou, metoda silová, výsledkem je stupeň stability

Metoda konečných prvků – deformační metoda, umožňuje stanovit jak stupeň stability, tak i přetvárné chování

METODY MEZNÍ ROVNOVÁHY

- nezahrnuje vliv přetvárných parametrů
- výsledkem výpočtu je tzv. **součinitel stability F**

$$F = \text{pasivní síly} / \text{aktivní síly}$$

pasivní síly - přispívají ke stabilitě

aktivní síly - snižují stabilitu

- nevýhoda: nutno předem zadat **výchozí smykovou plochu**, na níž se pak určuje součinitel stability
- patří k nim např. **proužkové metody** (Petterssonova, Bishopova, ...)

ZÁKLADNÍ METODY STABILITNÍ ANALÝZY A JEJICH DETERMINUJÍCÍ FAKTORY

Metody mezní rovnováhy

umožňují pouze stabilitní kvantifikaci porovnáním pasivních a aktivních sil na smykové ploše



- geometrické parametry
- materiálové parametry: objemová tíha, soudržnost, úhel vnitřního tření, ...
- numerické parametry metody: např. počet proužků, ...

Numerické deformační metody (metoda konečných prvků, ...)

umožňují vyhodnotit napěťo-deformační stav a na jeho základě provést stabilitní kvantifikaci s využitím metody redukce smykových parametrů (Shear Strength Reduction Method - Duncan 1996)



- geometrické parametry
- materiálové parametry: objemová tíha, soudržnost, úhel vnitřního tření, modul pružnosti, Poissonovo číslo, ...
- numerické parametry metody: rozsah modelu, použitý typ prvků, hustota sítě, počet iterací, přesnost iteračního výpočtu ...

METODA REDUKCE PEVNOSTNÍCH SMYKOVÝCH PARAMETRŮ (SHEAR STRENGTH REDUCTION METHOD - SSRM)

- základní princip formulován Duncanem (1996)
- implementována např. ve výpočetních programech Phase nebo Plaxis (pod názvem „phi-c reduction method“)
- definice stupně bezpečnosti SSRF (Shear Strength Reduction Factor):

$$\text{SSRF} = \frac{\tau}{\tau_f}$$

τ ... skutečná smyková pevnost zemin

τ_f ... minimální smyková pevnost potřebná k zachování neporušenosti



výchozí Mohr-Coulombova podmínka pevnosti a porušení charakterizovaná skutečnými parametry smykové pevnosti c a φ

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c$$



redukce smykových parametrů c , φ koeficientem F



Mohr-Coulombova podmínka pevnosti charakterizovaná redukovanými parametry smykové pevnosti c^* a φ^*

$$\frac{\tau}{F} = \sigma \frac{\tan \varphi}{F} + \frac{c}{F} = \sigma \tan \varphi^* + c^*$$

$$c^* = \frac{c}{F}, \varphi^* = \arctan\left(\frac{\tan \varphi}{F}\right)$$



stupeň stability svahového tělesa SSRF je roven takové max. hodnotě redukčního koeficientu F , pro který je ještě zachován neporušený stav

CHARAKTERISTIKA ANALYZOVANÉ STABILITNÍ ÚLOHY

- geometrie modelovaného tělesa: symetrický násyp výšky 4 m
šířka koruny násypu 26.5 m
sklon 32 °
- podzemní voda není uvažována
- materiálové charakteristiky zemin v podloží a v násypu

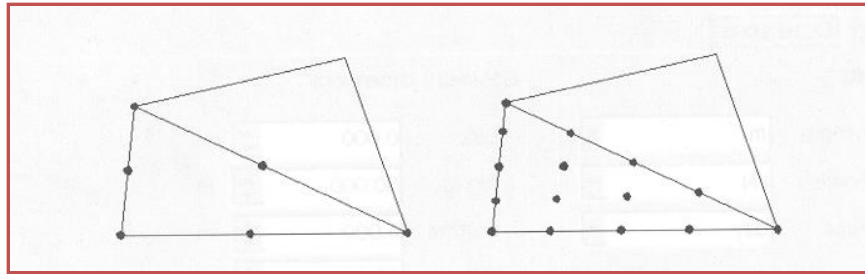
	objem.tíha (kN/m ³)	modul pružnosti (MPa)	Poissonovo číslo	soudržnost (kPa)	úhel vnitřního tření (°)
materiál v podloží	20	variantně:5,10,40,50,500	0.4	16	28
materiál v násypu	21.3	variantně:2.5,5,10,40,50	0.3	2	25

- aplikovaná výpočetní numerická metoda: metoda konečných prvků (programový systém Plaxis)
- materiálový model: Mohr-Coulomb
- variantní parametry výpočtů:

modul pružnosti materiálu v násypu i podloží

hustota sítě konečných prvků: (91-3864 prvků)

typ konečných prvků: trojúhelníkové 6-ti uzlové a 15-ti uzlové prvky

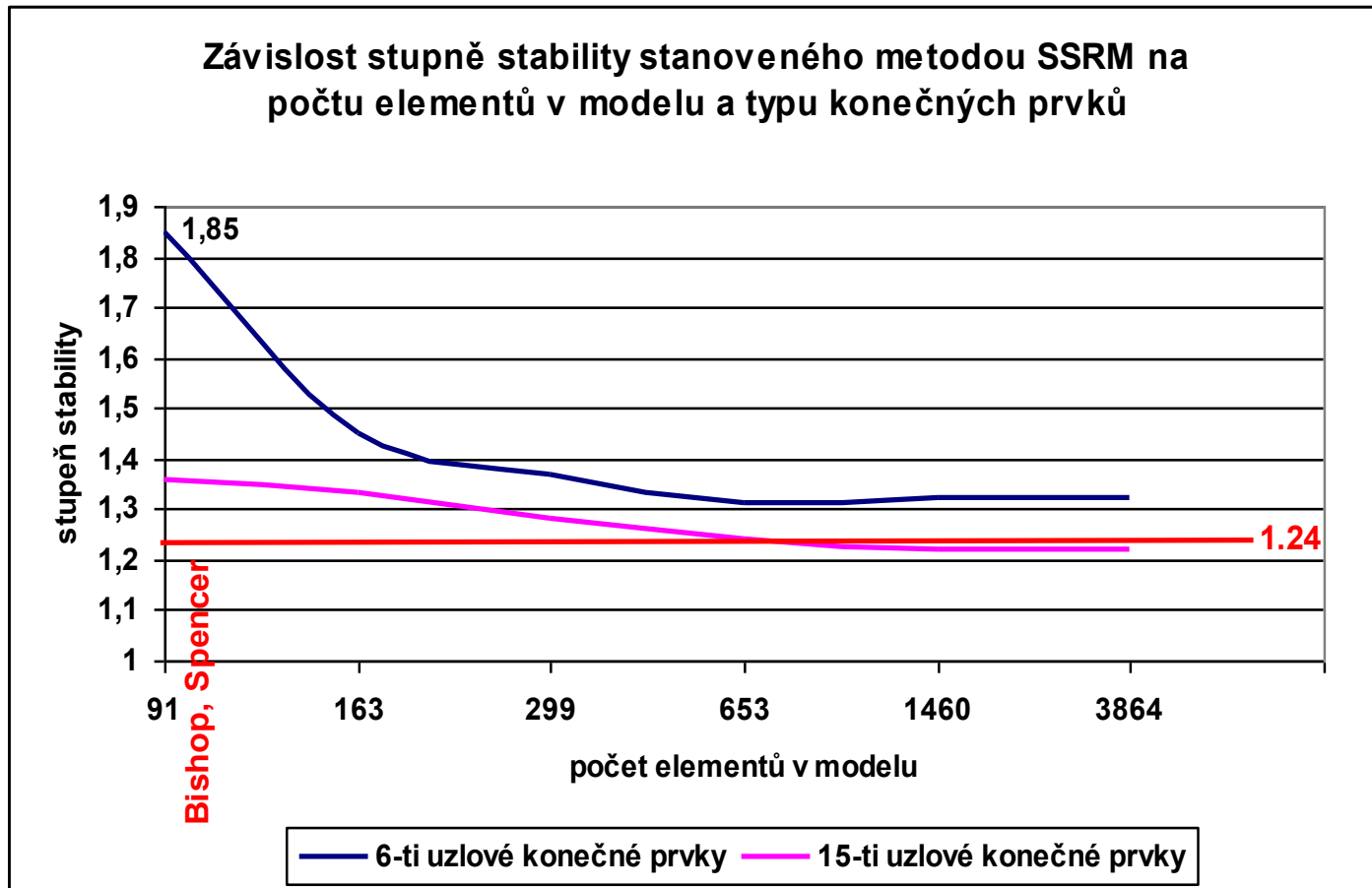


přesnost iteračního výpočtu: 0.0001 - 0.1

CITLIVOSTNÍ ANALÝZA HODNOT STUPNĚ STABILITY A LOKALIZACE A CHARAKTERU KRITICKÉ SMYKOVÉ PLOCHY NA PARAMETRECH SÍTĚ KONEČNÝCH PRVKŮ

Předpoklady: $E(\text{podloží})=5 \text{ MPa}$, $E(\text{násyp})=10 \text{ MPa}$, iterační přesnost: 0.01

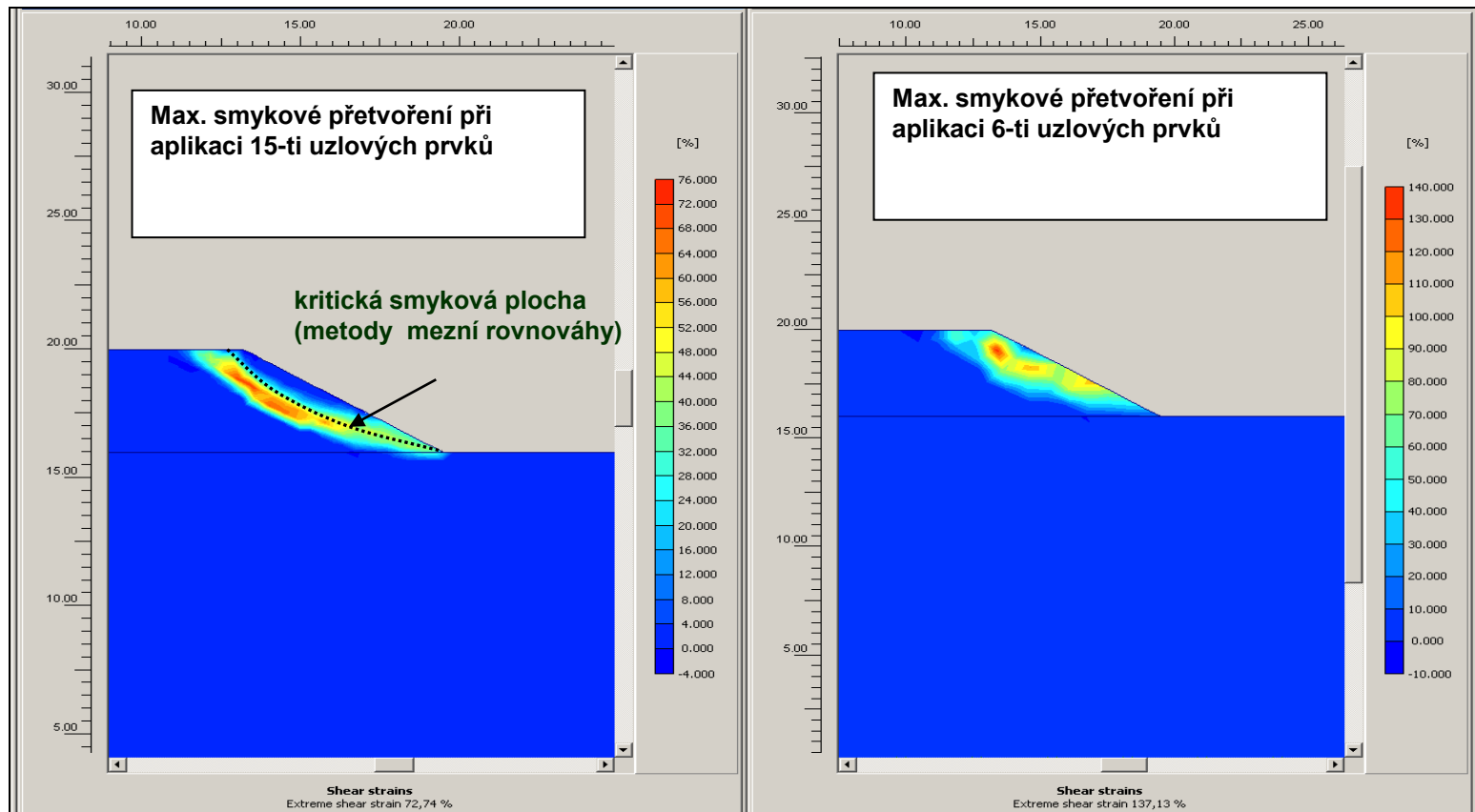
hustota sítě prvků (dle specifikace v programu Plaxis)	E(podloží) =5 MPa, E(násypu)=10 MPa				
	typ prvků	počet elementů v síti	počet uzlů v síti	průměrný rozměr prvků (m)	stupeň stability
velmi jemná s druhotným zjemněním	6	3864	7979	0.910	1.32
	15	3864	31413	0.910	1.22 ●
velmi jemná	6	1460	3109	1.48	1.31
	15	1460	12057	1.48	1.22 ●
jemná	6	653	1442	2.21	1.32
	15	653	5495	2.21	1.24 ●
střední	6	299	692	3.27	1.37
	15	299	2579	3.27	1.28
hrubá	6	163	394	4.43	1.45
	15	163	1439	4.43	1.33
velmi hrubá	6	91	230	5.93	1.85
	15	91	823	5.93	1.36
Bishop, Spencer	-	-	-	-	1.24



Modelování v geotechnice – Modelování stability svahových těles

Lokalizace a tvar smykové plochy v závislosti na typu konečných prvků

počet prvků: 1460 (velmi jemná síť)



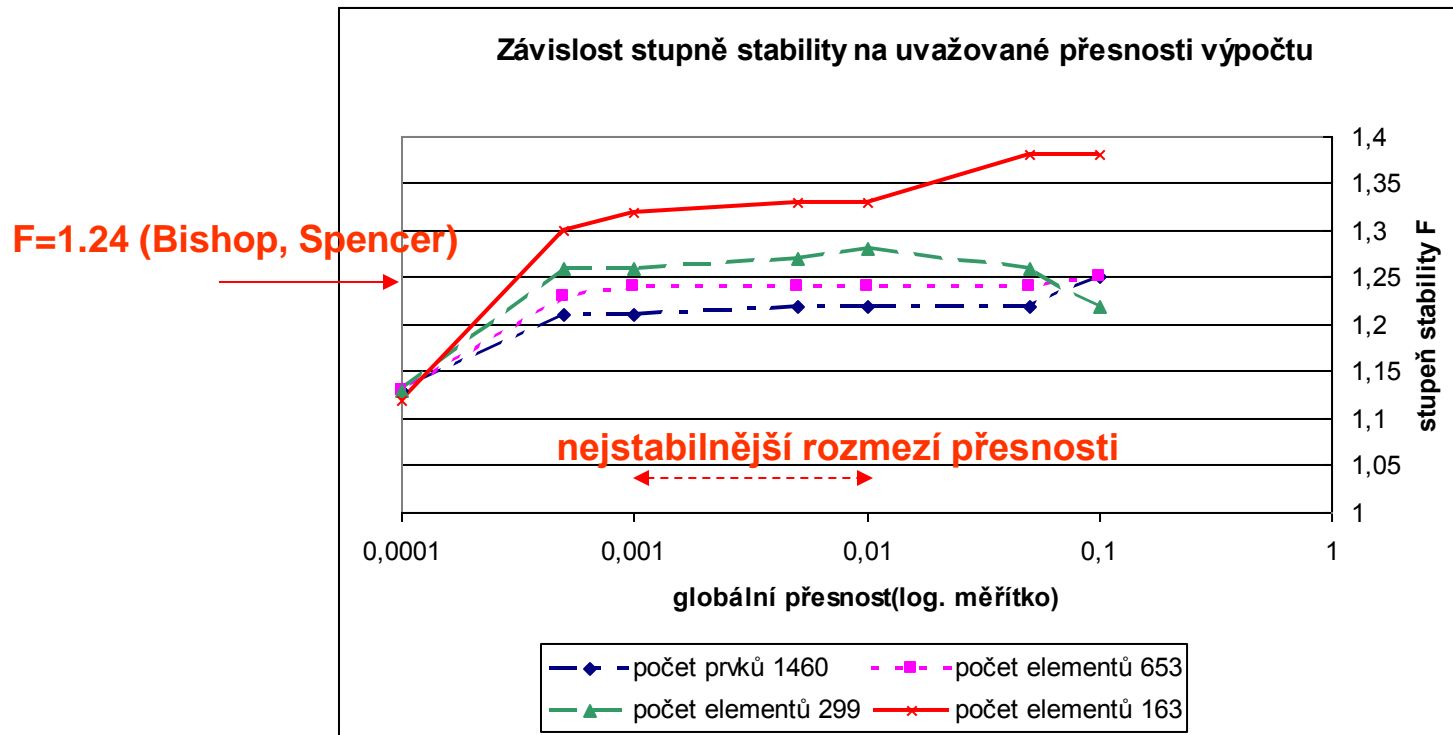
VÝSLEDKY STABILITNÍ A DEFORMAČNÍ SITUACE V NÁSYPU V ZÁVISLOSTI NA MODULECH PRUŽNOSTI

Předpoklady: velmi jemná síť, 15-ti uzlové trojúh. konečné prvky , iterační přesnost: 0.01

- celkem analyzováno 25 variant kombinací modulů pružnosti materiálu násypu a podloží:
E(podloží): 5, 10, 40, 50, 500 MPa
E(násyp): 2.5, 5, 10, 40, 50 MPa
- $SSRF = 1.22$ je nezávislý na modulech pružnosti
- lokalizace a charakter kritické smykové plochy jsou nezávislé na modulech pružnosti
- vliv na horizontální i vertikální posuny v analyzovaném tělese

CITLIVOSTNÍ ANALÝZA HODNOT STUPNĚ STABILITY KRITICKÉ SMYKOVÉ PLOCHY NA PŘIJATÉ PŘESNOSTI ITERAČNÍHO VÝPOČTU

Předpoklady: 15-ti uzlové trojúhelníkové konečné prvky



ZÁVĚREČNÁ SHRNUTÍ A DOPORUČENÍ PLYNOUCÍ Z MODELOVÉ ANALÝZY

Vyhodnocovaný faktor		Citlivost SSRF	Poznámka
Modul pružnosti v násypu i podloží		-	ovlivňují pouze hodnoty posunů
Hustota sítě a typ konečných prvků	6-ti uzlové trojúhel. prvky	++	se vzrůstající hustotou sítě se hodnoty stupně stability shora blíží k hodnotě stanovené metodou mezní rovnováhy (rozdíl cca 6%), rozdíl hodnoty pro nejvyšší a nejnižší hustotu 50%
	15-ti uzlové trojúhel. prvky	+	se vzrůstající hustotou klesají hodnoty stupně stability k hodnotě stanovené metodou mezní rovnováhy $F=1.24$, rozdíl hodnoty pro nejvyšší a nejnižší hustotu cca 11%
Iterační přesnost		+	hodnota stupně stability pro nejnižší uvažovanou přesnost je o 8 %-23 % vyšší než pro nejvyšší přesnost (v závislosti na hustotě sítě), nejstabilnější hodnota stupně stability v rozmezí přesnosti 0.001-0.01 (výsledky potvrzují doporučení pro volbu přesnosti v manuálu Plaxisu – max. doporučená hodnota 3%)

Doporučení pro analyzovanou úlohu z hlediska dosažení identického stupně stability 1.24 aplikovanými výpočetními metodami:

modul pružnosti materiálu násypu i podloží libovolný, 15-ti uzlové trojúhelníkové prvky, jemná síť s 653 prvky, iterační přesnost: 0.01