

## Posouzení stability svahu

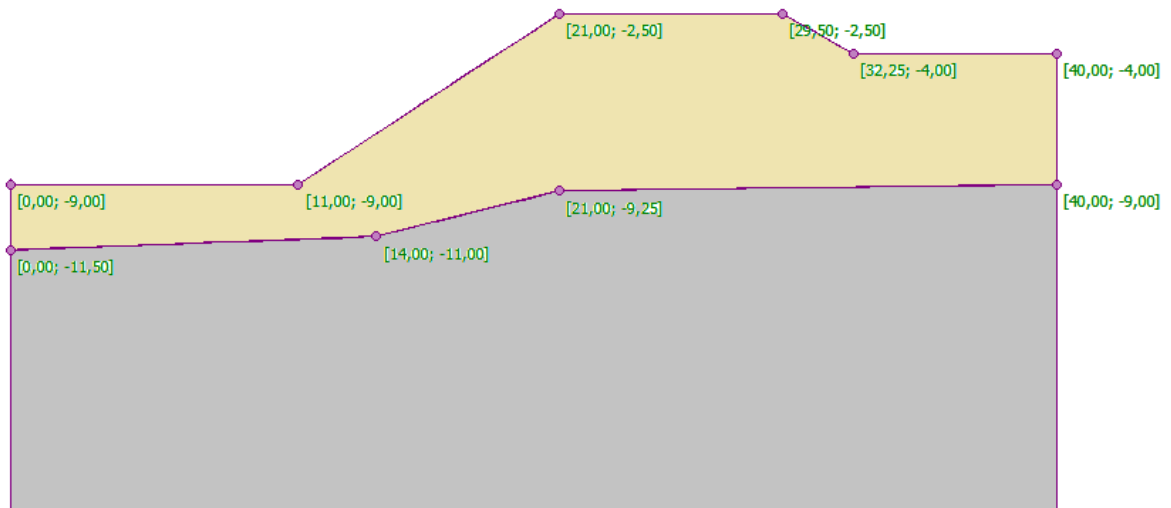
Program: MKP

Soubor: Demo\_manual\_25.gmk

Cílem tohoto manuálu je vypočítat stupeň stability svahu pomocí metody konečných prvků.

### Zadání úlohy

Určete stupeň stability svahu nejprve bez působení a poté i s vlivem pásového přetížení o velikosti  $q = 35,0 \text{ kN/m}^2$ . Schéma geometrie svahu pro všechny fáze budování (včetně jednotlivých bodů rozhraní) je patrné z následujícího obrázku. Dále proveďte stabilizaci svahu pomocí předpjatých kotev.



*Schéma modelovaného svahu – jednotlivé body rozhraní*

Geologický profil se skládá ze dvou zemin, které mají následující parametry:

Parametry zemin / Klasifikace (zatřídění)	Zemina č. 1	Zemina č. 2 – R4
Objemová tíha zeminy: $\gamma$ [ $kN/m^3$ ]	18	20
Modul pružnosti: $E$ [ $MPa$ ]	21	300
Poissonovo číslo: $\nu$ [–]	0,3	0,2
Soudržnost zeminy: $c_{ef}$ [ $kPa$ ]	9	120
Úhel vnitřního tření: $\phi_{ef}$ [°]	23	38
Úhel dilatance: $\psi$ [°]	0	0
Objemová tíha saturované zeminy: $\gamma_{sat}$ [ $kN/m^3$ ]	20	22

Tabulka s parametry zemin – posouzení stability svahu

## Řešení

K výpočtu této úlohy použijeme program GEO 5 – MKP. V následujícím textu postupně popíšeme řešení příkladu po jednotlivých krocích:

- Topologie: nastavení a modelování úlohy (rozhraní, generování sítě),
- Fáze budování 1: výpočet stupně stability původního svahu bez pásového přitížení,
- Fáze budování 2: výpočet stupně stability svahu s působením pásového přitížení,
- Fáze budování 3: stabilizace svahu pomocí kotev, výpočet stupně stability svahu.
- Vyhodnocení výsledků: porovnání, závěr.

## Topologie: zadání úlohy

V rámu „Nastavení“ zvolíme typ výpočtu s možností *stabilita svahu*. Ostatní parametry ponecháme beze změn.

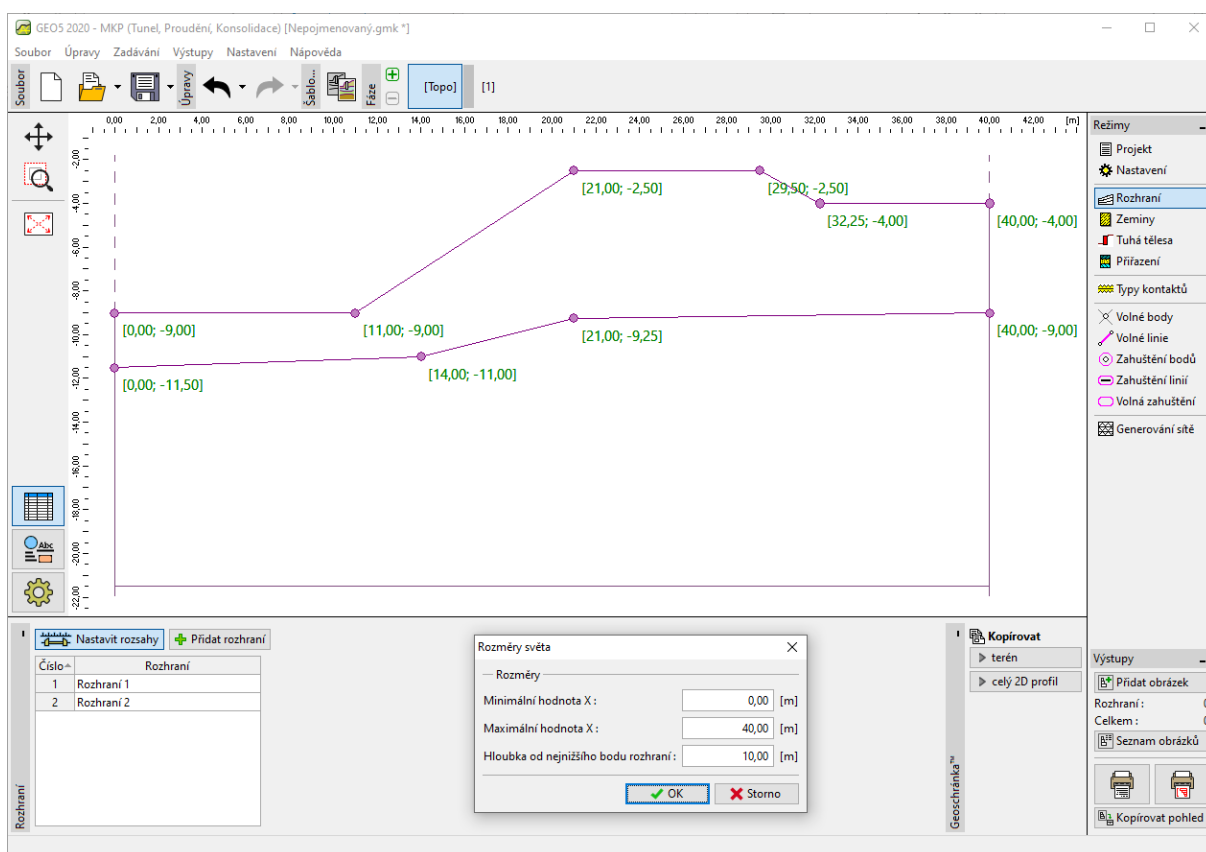
Charakteristiky úlohy	Výpočtové normy	Rozšířené možnosti programu
Geometrie úlohy: <input type="text" value="Rovinná"/>	Betonové konstrukce: <input type="text" value="EN 1992-1-1 (EC2)"/>	<input type="checkbox"/> Podrobné parametry generování sítě
Typ výpočtu: <input type="text" value="Stabilita svahu"/>		<input type="checkbox"/> Podrobné parametry zemin
<input type="checkbox"/> Umožnit zadat vodu pomocí výpočtu ustáleného proudění		<input type="checkbox"/> Speciální modely zemin
		<input type="checkbox"/> Podrobné výsledky

Rám „Nastavení“

*Poznámka: Zadání a tvorba modelu v režimu „Stabilita svahu“ je zcela shodná s módem „Napjatost“.*  
*Pomocí tlačítka „Výpočet“ se spouští posouzení stupně stability pro danou úlohu. Jednotlivé výpočty stability svahu ve fázích budování jsou pak zcela samostatné (nezávislé) a nemají žádný vztah k předchozím fázím a výpočtům (více viz Help – F1).*

Dále zadáme rozměry světa, které zvolíme dostatečně velké, aby výsledky nebyly ovlivněny podmínkami na okraji. Pro naši úlohu zvolíme rozměry modelu (0 m; 40 m), hloubku od nejnižšího bodu rozhraní zadáme 10 m.

Poté pro jednotlivé vrstvy zemin definujeme body rozhraní, které jsou uvedeny v následující tabulce.



Dialogové okno „Rozměry světa“

	Rozhraní 1		Rozhraní 2	
	x [m]	z [m]	x [m]	z [m]
1	0,00	-9,00	0,00	-11,50
2	11,00	-9,00	14,00	-11,00
3	21,00	-2,50	21,00	-9,25
4	29,50	-2,50	40,00	-9,00
5	32,25	-4,00		
6	40,00	-4,00		

Seznam bodů pro jednotlivá rozhraní vrstev zemín

Nyní zadáme příslušné parametry zeminy a následně přiřadíme zeminy do jednotlivých oblastí. Pro tuto úlohu zvolíme Drucker-Pragerův model (více viz *poznámka*). Úhel dilatance  $\psi$  uvažujeme pro obě vrstvy zemín jako nulový, tj. materiál v plastickém stavu nemění při smykovém namáhání svůj objem (více viz Help – F1).

**Přidání nových zemín**

**Identifikace**  
Název: Zemina č. 1

**Materiálový model**  
Materiálový model: Drucker - Prager

**Základní data**  
Objemová tíha:  $\gamma = 18,00$  [kN/m<sup>3</sup>]  
Modul pružnosti:  $E = 21,00$  [MPa]  
Poissonovo číslo:  $\nu = 0,30$  [-]

**Vztlak**  
Způsob výp.vztlaku: standardní  
Obj.tíha sat.zeminy:  $\gamma_{sat} = 20,00$  [kN/m<sup>3</sup>]

**Model Drucker - Prager**  
Modul odtížení / přitížení:  $E_{ur} = 21,00$  [MPa]  
Úhel vnitřního tření:  $\phi_{ef} = 23,00$  [°]  
Soudržnost zeminy:  $c_{ef} = 9,00$  [kPa]  
Úhel dilatance:  $\psi = 0,00$  [°]

**Zobrazení**  
Kategorie vzorků: GEO  
Hledat:   
Podkategorie: Zeminy (1 - 16)  
Vzorek: 2 Hlína písčita  
Barva:   
Pozadí: automatické  
Sytost <10 - 90>: 50 [%]

Zatříd Vymaž Přidej Storno

**Úprava vlastností zeminy**

**Identifikace**  
Název: Zemina čís. 2 - R4

**Materiálový model**  
Materiálový model: Drucker - Prager

**Základní data**  
Objemová tíha:  $\gamma = 20,00$  [kN/m<sup>3</sup>]  
Modul pružnosti:  $E = 300,00$  [MPa]  
Poissonovo číslo:  $\nu = 0,20$  [-]

**Vztlak**  
Způsob výp.vztlaku: standardní  
Obj.tíha sat.zeminy:  $\gamma_{sat} = 22,00$  [kN/m<sup>3</sup>]

**Model Drucker - Prager**  
Modul odtížení / přitížení:  $E_{ur} = 300,00$  [MPa]  
Úhel vnitřního tření:  $\phi_{ef} = 38,00$  [°]  
Soudržnost zeminy:  $c_{ef} = 120,00$  [kPa]  
Úhel dilatance:  $\psi = 0,00$  [°]

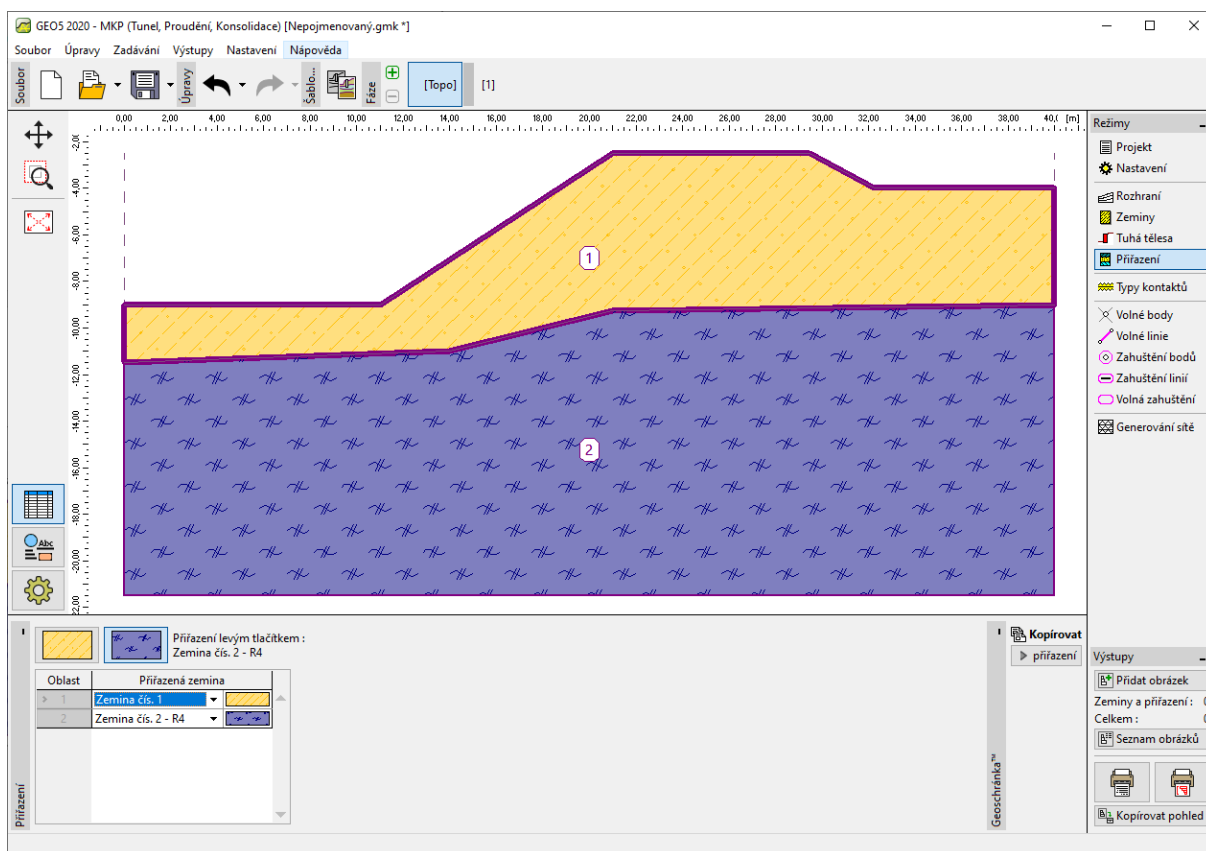
**Zobrazení**  
Kategorie vzorků: GEO  
Hledat:   
Podkategorie: Horniny (21 - 36)  
Vzorek: 24 Granulit  
Barva:   
Pozadí: automatické  
Sytost <10 - 90>: 50 [%]

Zatříd Vymaž OK + OK Storno

Dialogové okno „Přidání nových zemín“

Poznámka: Pro výpočet stability svahu je zapotřebí zvolit nelineární model zeminy, který předpokládá vznik plastických oblastí, resp. deformací a je definován základními parametry smykové pevnosti zemin  $\phi$  a  $c$ . V tomto případě jsme zvolili Drucker-Pragerův materiálový model z důvodu poddajnější odezvy konstrukce oproti klasickému Mohr-Coulombovu modelu (více viz Help – F1). Srovnání výsledků dosažených pomocí jednotlivých nelineárních materiálových modelů je v tabulce na konci tohoto příkladu.

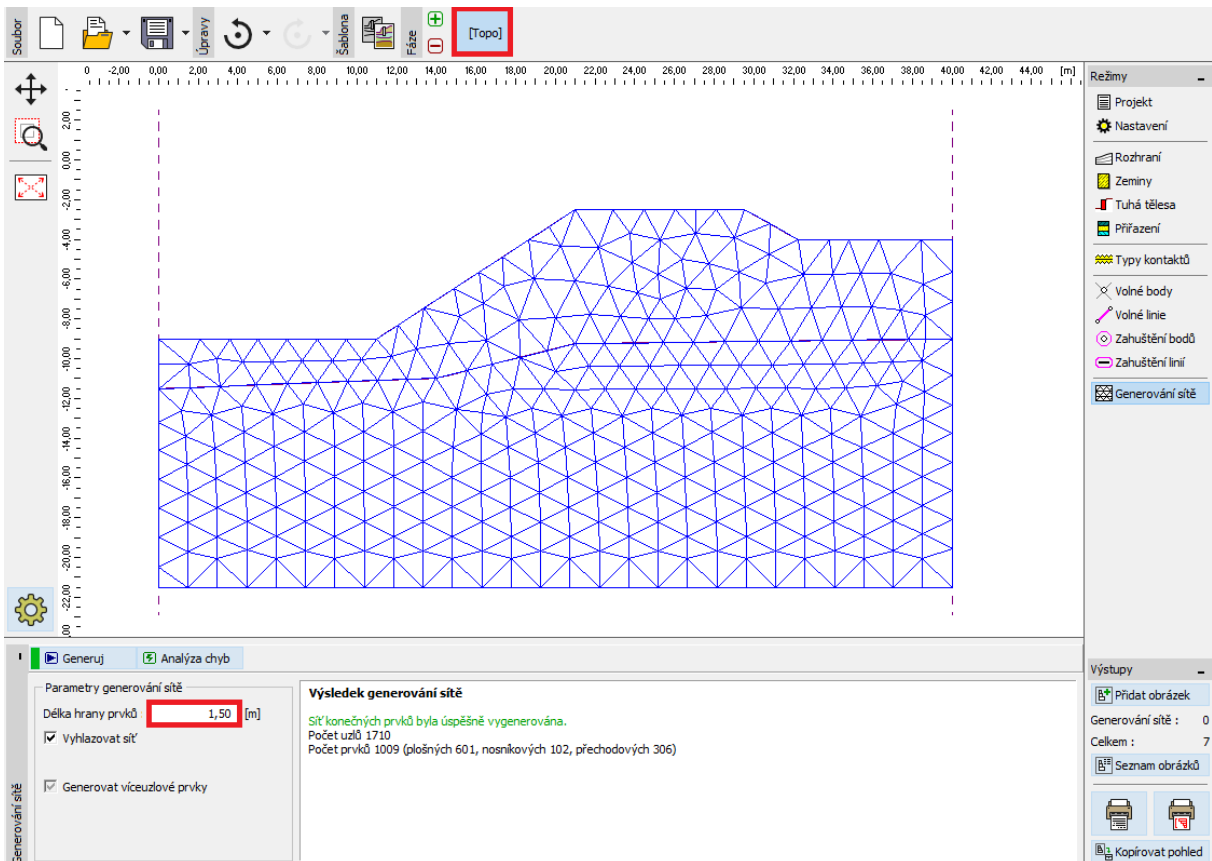
Na následujícím obrázku je zobrazeno přiřazení zemin do geologického profilu.



Rám „Přiřazení“

Posledním krokem při zadávání topologie je vygenerování sítě konečných prvků. Hustota sítě má značný vliv na výsledný stupeň stability, proto je nutné zvolit síť vždy dostatečně hustou.

Pro tento příklad zvolíme délku hrany prvků 1,5 m a vygenerujeme síť (pomocí tlačítka „Generuj“). Na konci tohoto příkladu jsou v tabulce uvedeny výsledky získané programem GEO 5 – MKP pro síť o délce hrany prvků 1,0; 1,5 a 2,0 m.



Rám „Generování sítě“ – délka hrany prvků 1,5 m

## Fáze budování 1: výpočet stupně stability

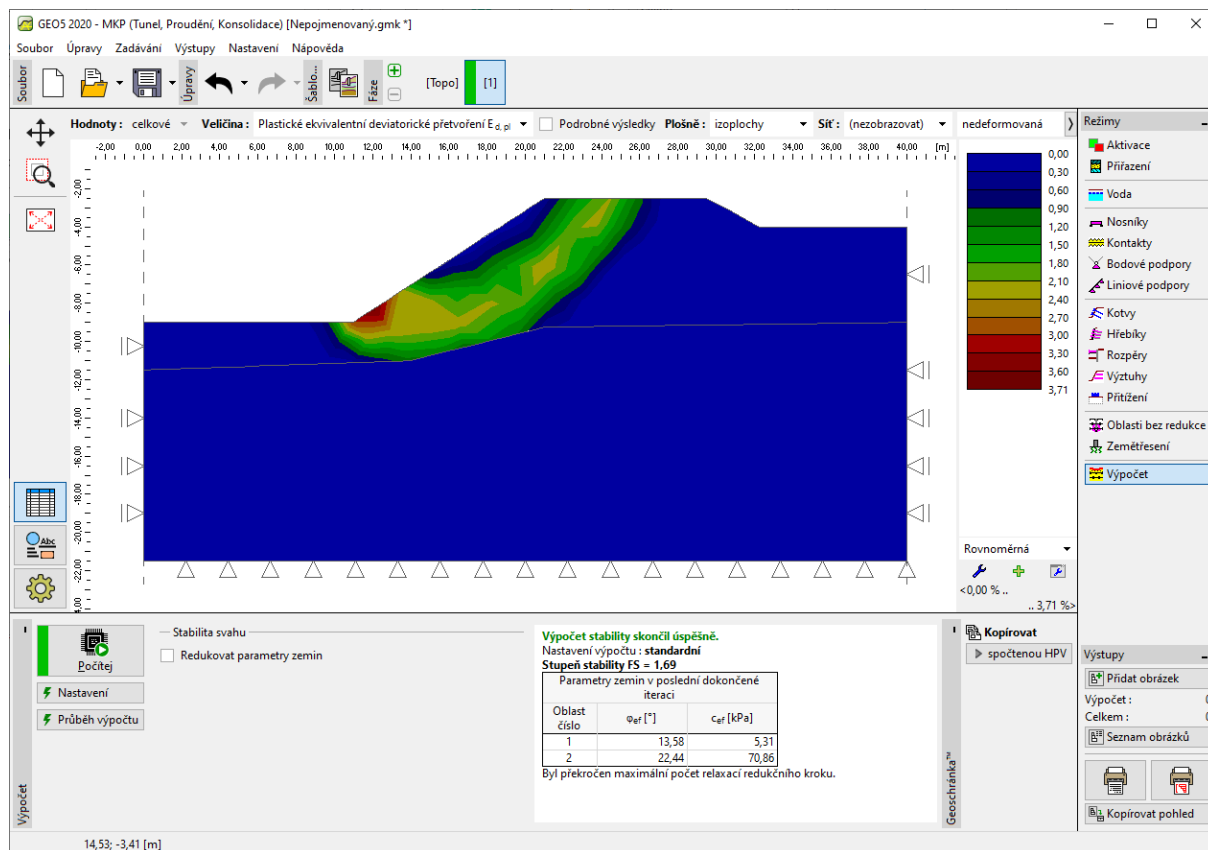
Po vygenerování sítě KP přejdeme do 1. fáze budování a provedeme výpočet (stisknutím tlačítka „Počítej“). Nastavení výpočtu ponecháme jako „Standardní“.

Dialogové okno „Nastavení výpočtu“

*Poznámka: Vlastní výpočet stupně stability je založen na metodě **redukce parametrů pevnosti zeminy**  $c$ ,  $\phi$ . V rámci této metody je stupeň stability definován jako parametr, kterým je nutno redukovat skutečné hodnoty parametrů  $c$ ,  $\phi$  vedoucí ke ztrátě stability (více viz Help – F1). Stupeň stability svahu se v programu definuje vztahem:  $FS = \tan \phi^{skut.} / \tan \phi^{porušení}$ ,*

kde:  $\phi^{skut.}$  skutečná hodnotu úhlu vnitřního tření,  
 $\phi^{porušení}$  hodnota úhlu vnitřního tření v okamžiku porušení.

Velice vhodným výstupem pro stabilitní výpočty je zobrazení vektorů posunutí a ekvivalentní plastické deformace  $\varepsilon_{eq.,pl.}$ . Plastické deformace ukazují tvar a velikost potenciální smykové plochy porušení masivu (viz následující obrázek).



Rám „Výpočet“ – Fáze budování 1 (ekvivalentní plastické deformace  $\epsilon_{eq,pl.}$ )

Poznámka: Program v módu stabilita umožňuje výstup pouze deformací (ve směru Z a X) a přetvoření (celkového, resp. plastického). Deformace konstrukce odpovídá stavu výpočtu pro redukované parametry zemín, nemá tedy se skutečnou deformací nic společného – podává pouze obraz chování celého svahu, resp. konstrukce v okamžiku porušení (více viz Help – F1).



## Fáze budování 2: přidání přitížení svahu, výpočet

V této fázi budování nejprve přejdeme do rámu „Přítížení“ a definujeme následující parametry – charakteristiky a velikost přitížení.

The screenshot shows the 'Nová přitížení' (New Load) dialog box in the GEO5 software. The dialog box is highlighted with a red border and contains the following fields:

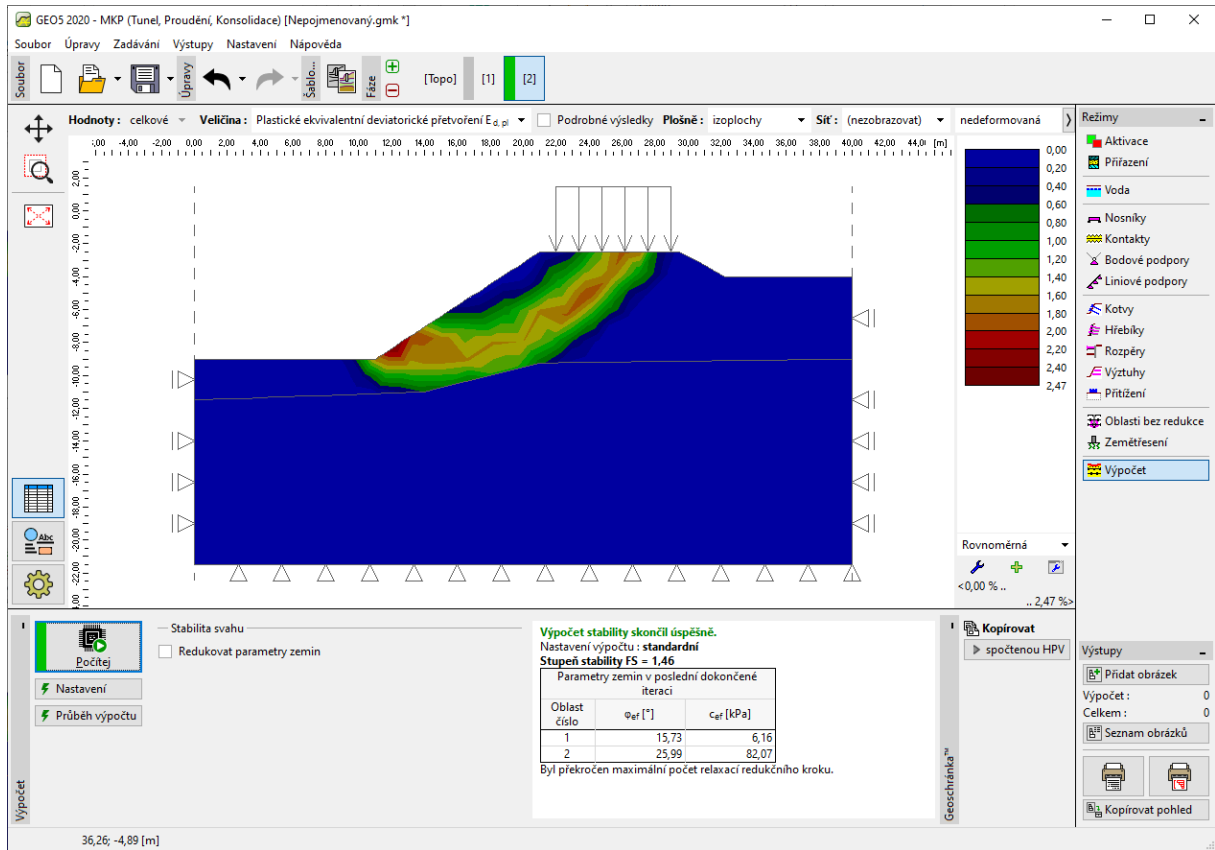
- Název: Přítížení čís. 1
- Charakteristiky přitížení:
  - Typ: pásové
  - Umístění: na povrchu
  - Počátek: x = 22,00 [m]
  - Délka: l = 7,00 [m]
  - Sklon:  $\alpha = 0,00$  [°]
- Velikost přitížení:
  - Velikost: q = 35,00 [kN/m<sup>2</sup>]

Below the dialog box, a table lists the parameters for the added load:

Číslo	Přítížení nové / změna	Název	Typ	Umístění / Bod 1 z [m] / x <sub>1</sub> [m]	Počátek / Bod 1 x [m] / z <sub>1</sub> [m]	Délka / Bod 2 l [m] / x <sub>2</sub> [m]	Šířka / Bod 2 b [m] / z <sub>2</sub> [m]	Sklon $\alpha$ [°]	q, q <sub>1</sub>
1	Ano	Přítížení čís. 1	pásové	na povrchu	x = 22,00	l = 7,00		0,00	

Dialogové okno „Nová přitížení“ – Fáze budování 2

Nyní provedeme výpočet 2. fáze a prohlédneme si ekvivalentní plastické deformace.



Rám „Výpočet“ – Fáze budování 2 (ekvivalentní plastické deformace  $\epsilon_{eq,pl.}$ )

## Fáze budování 3: stabilizace svahu kotvami, výpočet

Přidáme 3. fázi budování. Poté v rámu „Kotvy“ stiskneme tlačítko „Přidat“ a v dialogovém okně „Nové kotvy“ zadáme ocelovou kotvu s velikostí předpínací síly  $F = 50 \text{ kN}$ . V této úloze budeme uvažovat následující parametry kotvy:

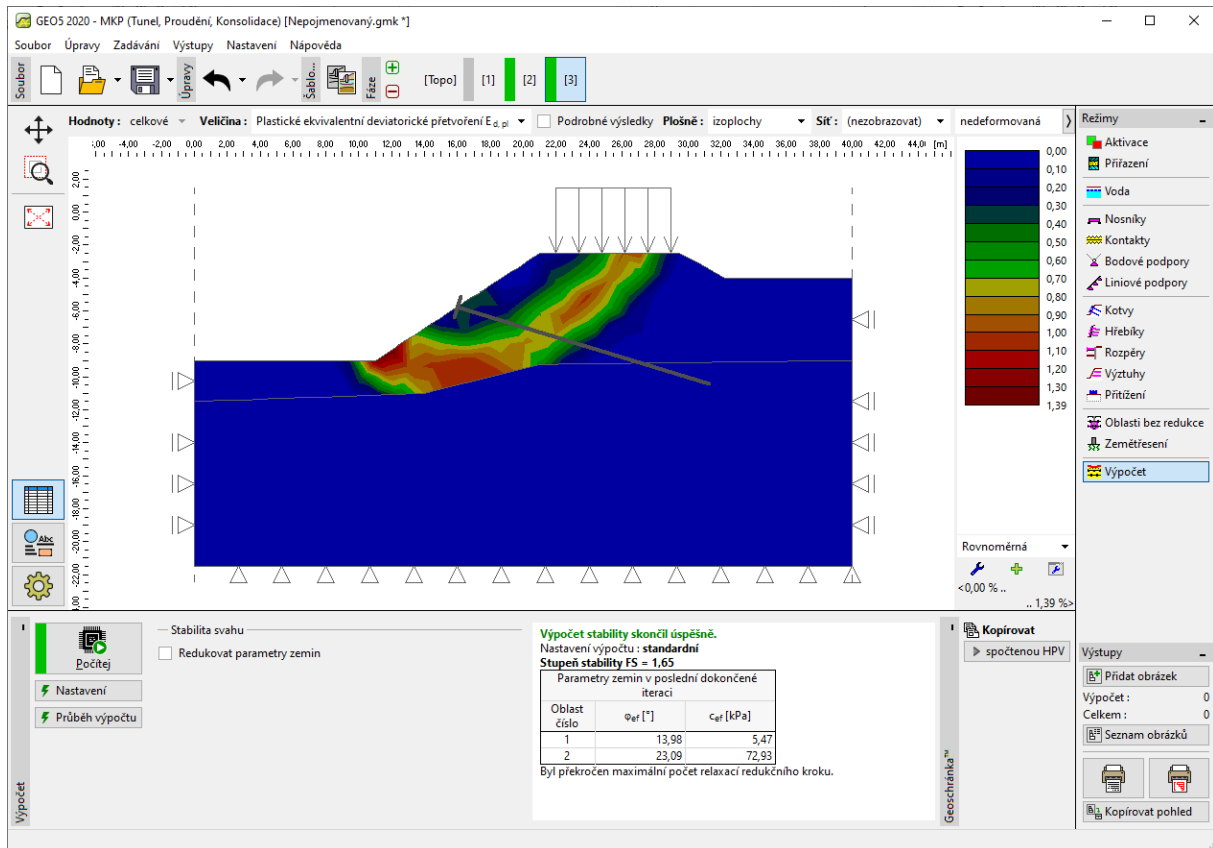
- Délka kotvy:  $l = 16 \text{ m}$ ,
- Sklon kotvy:  $\alpha = 17^\circ$ ,
- Průměr kotvy:  $d = 20 \text{ mm}$ ,
- Vzdál. kotev:  $b = 1 \text{ m}$ .

Číslo	Kotva	Kotva	Počátek	Délka a sklon / souřadnice	Vzd. kotev	Průměr / plocha	Modul pružnosti	Síla na m.přetrž.	Působí v tlaku	Síla
	nová	dopnutá	x [m]	l [m] / x [m]	b [m]	d [mm] / A [mm²]	E [MPa]	F <sub>c</sub> [kN]		F [kN]
1	Ano		16,00	16,00 / x = 17,00	1,00	d = 20,0	210000,00	1000000,00		50,00

Dialogové okno „Nové kotvy“ – Fáze budování 3

*Poznámka: U výpočtu stability svahu vstupují předepnuté kotvy do vlastního výpočtu jako přitížení silou, která působí v hlavě kotvy – tuhost kotvy tedy nemá na stabilitu vliv. V hlavě kotvy však může dojít ke zplastizování zeminy. Po výpočtu je tedy nutné prověřit umístění a reálnost plastických deformací, které představují smykovou plochu. V případě zplastizování zeminy pod hlavou kotvy je nutné provést úpravy modelu (více viz Help – F1).*

Ostatní vstupní parametry zůstávají beze změn. Nyní provedeme výpočet 3. fáze budování a opět si prohlédneme výsledky řešení (obdobně jako v předchozí fázi budování).

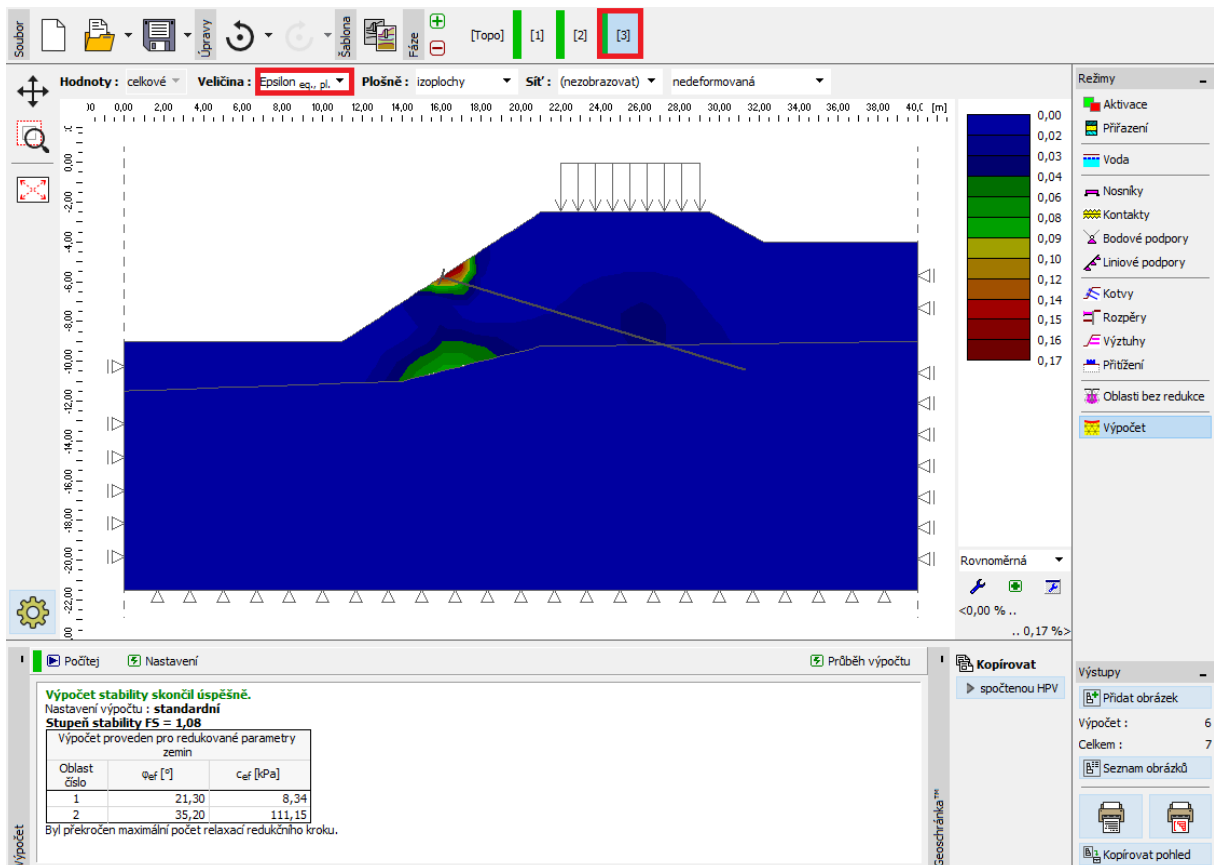


Rám „Výpočet“ – Fáze budování 3 (ekvivalentní plastické deformace  $\epsilon_{eq,pl.}$ )

Tímto krokem jsou úvodní výpočty u konce. Výsledné hodnoty pro stupeň stability svahu zaznamenejme do souhrnné tabulky a nyní provedeme posouzení dané úlohy pro ostatní materiálové modely (Mohr-Coulomb a modifikovaný Mohr-Coulomb).

*Poznámka: Kontrola tvaru smykové plochy je v některých případech velmi důležitá, protože může dojít k lokální poruše konstrukce i v jiných oblastech, než očekáváme (více viz Help – F1). Na následujícím obrázku je vidět zplastizování zeminy okolí hlavy kotvy při výpočtu s hustotou sítě 1,0 m pro Drucker-Pragerův model. Dojde-li k tomuto případu, je nutné vhodně upravit model konstrukce například:*

- zvětšit délku hrany prvků sítě,
- zadat u hlavy kotvy únosnější zeminu s vyššími pevnostními parametry  $c$ ,  $\phi$ ,
- definovat u hlavy kotvy nosíkové prvky (dojde k lepšímu roznosu zatížení do zeminy).
- Využít oblasti bez redukce – viz inženýrský manuál č. 35



Rám „Výpočet“ – Fáze budování 3 (zplastizování zeminy pod kotvou, DP model se sítí 1,0 m)

## Vyhodnocení výsledků

V následující tabulce jsou zobrazeny výsledky stupně stability svahu pro jednotlivé fáze budování. Výpočet jsme provedli pro některé nelineární materiálové modely v programu GEO 5 – MKP a různou hustotu sítě KP. Pro porovnání uvádíme také výsledky spočtené programem GEO 5 – Stabilita svahu (řešení podle Bishopa).

<b>Materiálový model</b>	<b>Krok sítě [m]</b>	<b>Fáze 1 FS</b>	<b>Fáze 2 FS</b>	<b>Fáze 3 FS</b>	<b>Poznámka</b>
<b>DP</b>	1,0	1,65	1,42	1,08 *	* Zemina plastizuje pod kotvou.
<b>DP</b>	1,5	1,69	1,46	1,65	
<b>DP</b>	2,0	1,71	1,48	1,69	
<b>MC</b>	1,0	1,52	1,35	0,90 *	* Zemina plastizuje pod kotvou.
<b>MC</b>	1,5	1,56	1,37	1,52	
<b>MC</b>	2,0	1,60	1,41	1,56	
<b>MCM</b>	1,0	1,76	1,54	1,20 *	* Zemina plastizuje pod kotvou.
<b>MCM</b>	1,5	1,81	1,58	1,76	
<b>MCM</b>	2,0	1,83	1,58	1,81	
<b>BISHOP (analytické řešení)</b>	---	1,51	1,33	1,47	viz níže
<b>SPENCER (analytické řešení)</b>	---	1,51	1,32	1,52	viz níže

*Souhrnný přehled výsledků – stupeň stability svahu*

*Poznámka: Nastavení výpočtu jsme uvažovali jako „Standardní – stupně bezpečnosti“. Výpočet jsme provedli nejprve podle Bishopa a poté podle Spencera s optimalizací kruhové smykové plochy (bez omezení).*

## Závěr

Z výsledků numerického řešení lze vyvodit následující závěry:

- Zahuštění sítě KP vede k přesnějším výsledkům, oproti tomu však dochází k prodloužení výpočetní doby pro každou fázi budování.
- Pro stabilitní výpočty je zapotřebí používat nelineární materiálové modely, které zohledňují vznik plastických deformací.
- Maximální ekvivalentní plastické deformace  $\varepsilon_{eq.,pl.}$  vyjadřují místa, kde se nachází potenciální smyková plocha porušení.
- Drucker-Pragerův materiálový model má o něco poddajnější odezvu konstrukce než Mohr-Coulombův model.