

### Namáhání ostění kolektoru

Program: MKP

Soubor: Demo\_manual\_23.gmk

Cílem tohoto manuálu je vypočítat namáhání ostění raženého kolektoru pomocí metody konečných prvků.

#### Zadání úlohy

Určete namáhání (deformace) ostění raženého kolektoru, jeho rozměry jsou patrné z následujícího obrázku. Stanovte vnitřní síly, které působí na ostění kolektoru. Ostění raženého kolektoru (tloušťky 0,1 m) je provedeno z železobetonu třídy C 20/25, dno je v hloubce 12,0 m. Geologický profil je homogenní, zemina má následující parametry:

_	Objemová tíha zeminy:	$\gamma = 20,0  kN/m^3$
_	Modul pružnosti:	E = 12,0 MPa
_	Poissonovo číslo:	$\nu = 0,40$
_	Efektivní soudržnost zeminy:	$c_{ef} = 12,0 \ kPa$
_	Efektivní úhel vnitřního tření:	$\phi_{ef}=21,0$ °
_	Objemová tíha saturované zeminy:	$\gamma_{sat} = 22,0  kN/m^3$



Schéma zadání úlohy – ražený kolektor

Hodnoty deformací a vnitřních sil budeme určovat pouze pro elastický model, protože nepředpokládáme vznik plastických deformací. Pro kontrolu podmínky plasticity následně použijeme Mohr-Coulombův materiálový model.

#### 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, volné body a linie zahuštění)
- Fáze budování 1: primární geostatická napjatost
- Fáze budování 2: modelování nosníkových prvků, výpočet deformací, vnitřní síly
- Vyhodnocení výsledků: porovnání, závěr.

#### Topologie: zadání úlohy

V rámu "Nastavení" ponecháme způsob výpočtu 1. fáze budování jako geostatickou napjatost. Typ úlohy, resp. výpočtu budeme uvažovat jako *rovinnou deformaci*.

— Charakteristiky ú	ilohy	— Výpočtové normy ————			— Rozšířené možnosti programu ———
Geometrie úlohy :	Rovinná 👻	Betonové konstrukce :	EN 1992-1-1 (EC2)	•	Podrobné parametry generování sítě
Typ výpočtu :	Napjatost 👻	— Výpočet primární na	pjatosti (1. fáze)		Podrobné parametry zemin
Tunely		Způsob výpočtu :	Geostatická napjatost	•	Specialní modely zemín     Dedeebe é védedler
Umožnit zadat	vodu pomocí výpočtu ustáleného proudění				Podrobne vysleaky



Dále zadáme rozměry světa a rozhraní terénu. Rozměry světa zvolíme dostatečně velké, aby výsledky nebyly ovlivněny podmínkami na okraji. Pro naši úlohu zvolíme rozměry modelu  $\langle -15 m; 15 m \rangle$ , vyšetřovanou hloubku vrstvy zadáme 20,0 m.

Poté přidáme rozhraní o souřadnicích (x, z): [-15, 0]; [15, 0] [m]



🤕 GEO5 2020 - MKP (Tunel, Proudění, Konsolidace) [Nepojmenovaný.gmk *]	-	- 🗆 ×
Soubor Úpravy Zadávání Výstupy Nastavení Nápověda		
ĝ		
12,00       -20,00       -18,00       -5,00       -4,00       -2,00       0,00       5,00       5,00       10,00       10,00       5,00       5,00       10,00       10,00       5,00       10,00       10,00       5,00       10,00       10,00       5,00       10,00       10,00       5,00       10,00	18.00, 20.00, (m) Re	zimy _ Projekt Nastavení Zeminy Tuhá tělesa Přizení Typy kontaktů Volné body Zahuštění bodů Zahuštění bodů Zahuštění bodů Generování sítě
1 Pridat rozahu 📥 Pridat rozhon (	🐘 Kopírovat	
Číslo+ Rozhraní	▶ terén Vý	ýstupy 🗕
1 Rozhraní 1	▶ celý 2D profil	Přidat obrázek
	Ro Cr	ozhraní: 0 Jelkem: 0
	E	📲 Seznam obrázků
sta statistica statistica statistica statistica statistica statistica statistica statistica statistica statisti		
zhran		
8		1븝 Kopirovat pohled

Rám "Rozhraní" + dialogové okno "Rozměry světa"

Nyní zadáme příslušné parametry zeminy včetně materiálového modelu a následně přiřadíme zeminu do vzniklé oblasti (více viz Help – F1).

Přidání nových zemin				×
— Identifikace —		— Model elastický ———— *	? -	— Zobrazení ————
Název :	zemina č. 1			Kategorie vzorků :
				GEO 🔹
<ul> <li>Materiálový mo</li> </ul>	del ? -			Hledat :
Materiálový model :	elastický 👻			Podkategorie :
— Základní data –	~~~~? ·			Zeminy (1 - 16) 🔹
Objemová tíha :	γ = 20,00 [kN/m <sup>3</sup> ]			Vzorek :
Modul pružnosti :	E = 12,00 [MPa]			
Tuhost s hloubkou :	konstantní 👻			/ / / / / / / / / / / / / / / / / ·
				3 Hlína štěrkovitá
Poissonovo číslo :	v = 0,40 [-]			Barva :
- Vztlak	? -			•
Způsob výp.vztlaku :	standardní 👻			Pozadí :
Obj.tíha sat.zeminy :	Vsat = 22.00 [kN/m <sup>3</sup> ]			automatické 🔹
				Sytost <10 - 90> : 40 [%]
			1	
Zatřiď	Vymaž			🕂 Přídej 🗙 Storno

Dialogové okno "Přidání nových zemin"

Dalším krokem je zadání geometrie konstrukce. Nejprve definujeme souřadnice volných bodů (tlačítko "Přidat"), které tvoří rohy kolektoru (více viz Help – F1).

Soubor		• C 👰 • 🗐 • 🗧	Šablona		
.t.		-1,80 -1,60 -1,40 -1,20	-1,00 -0,80 -0,60	-0,40 -0,20 0,00 0,20 0,40 0,60 0,80 1,00 1,20 1,40 1,60 1,80 2,00 2,20 2,4( [m]	Režimy _
÷	001				Projekt
0	8-				🔅 Nastavení
	- e-				Rozhraní
52	81				🗾 Zeminy
<u> </u>	- "		$\otimes^1$	s <sup>5</sup> ⊗ <sup>2</sup>	📕 Tuhá tělesa
	-10,60		[-1,00; -10,50]	[0,00; -10,50] [1,00; -10,50]	🗮 Přiřazení
					🗯 Typy kontaktů
	₽				🗴 Volné body
	8-				🗸 Volné linie
					Zahuštění bodů
	11,2				Zahušténí linií
	ŝ				🔀 Generování sítě
	7-				
	1,160				
	<u> </u>				
	1,18				
	8.1		⊗ <sup>4</sup>	3	
	¥-		[-1,00; -12,00]	[1,00; -12,00]	
	-12,20				
20	g				
25	- 4 T				
•	+ 🔊 F	ridat graficky	/ě	Nexteelation	Výstupy _
	Číclo	Umístění		Nove volne body X	Přidat obrázek
	CIBIO	x [m] z [m]		Umístění volného bodu	Volné body : 0
	> 1	-1,00 -10,50 ^		Souřadnice : x =   [m]	Celkem: 6
	2	1,00 -10,50		z = [m]	B Seznam obrazku
à	4	-1,00 -12,00		🔳 Přidej 🛛 Storno	
é bod	5	0,00 -10,50			
Vol		$\vee$			Copírovat pohled

Rám "Volné body" + dialogové okno "Nové volné body"

Následně v rámu "Volné linie" klikneme na tlačítko "Přidat" a pomocí kurzoru na obrazovce propojíme dané body příslušnými liniemi (více viz Help – F1). Pro zadání oblouku o poloměru R = 1,0 m musíme změnit typ linie (pomocí tlačítka "Upravit").



Dialogové okno "Úprava vlastností volné linie"

Tímto krokem je geometrie kolektoru zadána a přejdeme k vygenerování sítě KP (více viz Help – F1).

Pro parametry generování sítě zvolíme délku hrany prvků 1,0 m a stiskneme tlačítko **"Generuj"**. Program automaticky vygeneruje a vyhladí síť KP.



Rám "Generování sítě" – délka hrany prvků 1,0 m (bez lokálního zahuštění sítě)

Na první pohled je zřejmé, že vygenerovaná síť v okolí kolektoru je velmi řídká. Provedeme proto její zahuštění. Síť můžeme zahustit buď kolem linií, nebo kolem volných bodů. Pro zahuštění kolem ostění kolektoru (obecně výrubu) je vhodný následující postup:

- zadáme volný bod v okolí středu výrubu,
- provedeme zahuštění kolem tohoto bodu.

Poznámka: Vnitřní síly na nosnících se počítají v jednotlivých bodech sítě, a proto je nutné dostatečně zahustit volné linie a body sítě KP (více viz Help – F1).

Pro zahuštění sítě konečných prvků zadáme příslušný dosah r = 12,0 m a délku hrany prvků l = 0,2 m. Poté se vrátíme do rámu "Generování sítě" a opět vygenerujeme síť KP.



Dialogové okno "Nová zahuštění bodů"

Poznámka: Síť prvků by měla být dostatečně hustá hlavně v těch místech řešené oblasti, kde lze očekávat velké gradienty napětí (bodové podepření, ostré rohy, výruby atp.). Je nutné, aby dosah zahuštění byl alespoň 3 až 5 násobek hustoty ve středu zahuštění a aby obě hodnoty v bodech (délka, dosah) byly v rozumném poměru k hustotě sítě předepsané pro okolní oblast. Tímto se zaručí hladký přechod mezi oblastmi s rozdílnou hustotou (více viz Help – F1).



Rám "Generování sítě" – délka hrany KP 1,0 m (s lokálním zahuštěním sítě v okolí kolektoru)

### Fáze budování 1: primární geostatická napjatost

Po následném vygenerování vypadá síť v okolí kolektoru výrazně lépe. Nyní přejdeme do 1. fáze budování a provedeme výpočet primární geostatické napjatosti. Nastavení výpočtu ponecháme jako "Standardní" (více viz Help – F1).





Rám "Výpočet" – Fáze budování 1

### Fáze budování 2: modelování nosníkových prvků

V rámu "Aktivace" nejprve namodelujeme odtěžení zeminy z kolektoru – danou oblast zadáme jako neaktivní (více viz Help – F1).



Rám "Aktivace" – Fáze budování 2

Poté přejdeme do rámu "Nosníky" a namodelujeme ostění raženého kolektoru. Definujeme následující parametry – umístění nosníku (uvažujeme na všechny volné linie), materiál a třída betonu, výšku průřezu (0,1 m) a uložení konců nosníku (více viz Help – F1).

GEOS 2020 - MKP (Tunel, Proudění, Konsolidace) [Nepojmenovaný.gmk *] —						
Soubor Upravy Zadávání Výstupy Nastavení Nápovéda						
-1,20 -0,30 -0,60 -0,30 0,00 0,30 0,60 0,30	1.20 1.50 1.80 2.10 2.40 2.70 3.00 3.30 3.60 3.90 4.20 4.50 4.80 5.10 5.40 5.70 6.00 6.30 6.60 6.30 7.20 7.50 7.80 [m]	Režimy _				
• <u>-</u>	Nové nosniky	× Aktivace				
Q #-	- Topologie - Název	Přiřazení				
	Umístění: volná linie v Název: Norník ž 4	Voda				
	Volta finite - Holink C.4	Nosníky				
	Volná linie č. 4 Volná	Kontakty				
	Parametry Zacatek :	Bodové podpory				
	✓ Uvažovat vlastní tihu Konec :	Liniové podpory				
	- Průřez a materiál	Kotvy				
8- 81	Typ průřezu : obdélníková stěna 🔻 Typ materiálu : beton	<ul> <li>Hřebíky</li> </ul>				
T T T T T T T T T T T T T T T T T T T	Výška průřezu : h = 0.10 [m] Název : C 20/25	Rozpěry				
92-		Výztuhy				
	Sirka prurežu : D = 1,00 [m] Katalog Vlastni	Přitížení				
ş_ ************************************		Zatížení nosníků				
		Pružné oblasti				
Ř.	$I = 8.33E_{-}05 \text{ m}^{4}/\text{m} \cdot \Delta = 1.00E_{-}01 \text{ m}^{2}/\text{m} \cdot E = 30000 \text{ 00 MPa} \cdot G = 12500 \text{ 00 MPa}$	Výpočet				
	- Kontakty	Monitory				
	Kontakty					
		Grafy				
	Uvažovat kontakt vlevo	Grafy Stabilita				
	Uvažovat kontakt vlevo     Uvažovat kontakt vpravo       Typ kontaktu :	Grafy Stabilita				
	Uvažovat kontakt vlevo Uvažovat kontakt vlevo Typ kontaktu: Typ kontaktu:	Grafy Stabilita				
	Uvažovat kontakt vlevo Uvažovat kontakt vlevo Typ kontaktu: Typ kontaktu:	Grafy Stabilita				
32 -         State	Uvažovat kontakt vlevo Uvažovat kontakt vlevo Typ kontaktu: Typ kontaktu:	Grafy Stabilita				
Pidat graficky       Pidat graficky       Pidat textově	Uvažovat kontakt vlevo Uvažovat kontakt vlevo Typ kontaktu: Typ kontaktu:  Uvažovat kontakt vlevo Typ kontaktu:  Uvažovat kontaktu:  U	Grafy Stabilita				
Image: Second state sta	Uvažovat kontakt vlevo Typ kontaktu : Typ kontaktu : Uvažovat kontakt vlevo Typ kontaktu : Uvažovat kontakt vlevo Typ kontaktu : Typ ko	Grafy Stabilita Výstupy –				
image: space of the space o	Uvažovat kontakt vlevo Typ kontaktu :	Grafy Stabilita Výstupy – E <sup>A</sup> Přídat obrázek Nosniky : 0				
Image: Specific stress of the specific stress of th	Uvažovat kontakt vlevo Typ kontaktu : Typ kontaktu : Uložení [m] Uvažovat Vlaštní thu Uvažovat Vlaštní thu Vlaštní thu Uvažovat Vlaštní thu Vlaštní thu Uvažovat Vlaštní thu Vlaštní thu Vl	Grafy Stabilita Výstupy – B <sup>*</sup> Přídat obrázek Nosníky : 0 Celkem : 0				
Ř. –           Ak         Přídat graficky         Přídat textové           Číslon         Nosník         Umístění           Číslon         Nosník         Umístění           2         Ano         Volná linie č. 1           2         Ano         Volná linie č. 2           3         Ano         Volná linie č. 3	Uvažovat kontakt vjevo         Uvažovat kontakt vjevo           Typ kontaktu:         Typ kontaktu:           Uložení [m]         Uvažovat           Vložení [m]         Uvažovat           Přůřez         Materiál           Vložek         Konec           Vložní tíhu         Vlev           -         -           -	Grafy Stabilita Výstupy – E* Přídat obrázek Nosniky: 0 Celkem: 0 B* Seznam obrázků				
Pridat         Pridat<	Uvažovat kontakt vjevo         Uvažovat kontakt vjevo           Typ kontaktu:         Typ kontaktu:           Uložení [m]         Uvažovat           Přůřez         Materiál           Vložetek         Konec           Vložovat         Přůřez           Materiál         vlev           -         Image: Materiál           - <td>Grafy Stabilita Výstupy – B<sup>*</sup> Přídat obrázek Nosniky: 0 Celkem: 0 B<sup>*</sup> Seznam obrázků</td>	Grafy Stabilita Výstupy – B <sup>*</sup> Přídat obrázek Nosniky: 0 Celkem: 0 B <sup>*</sup> Seznam obrázků				
Pridat graficky         Pridat textové           Císlon         Nosník         Umístění           1         Ano         Volná linie č. 1           2         Ano         Volná linie č. 2           3         Ano         Volná linie č. 3           4         Ano         Volná linie č. 4	Uvažovat kontakt vlevo         Uvažovat kontakt vpravo           Typ kontaktu:         Typ kontaktu:           Uložení [m]         Uvažovat           Přůřez         Materiál           Začátek         Konec           Vložovat kontakt vlevo         Vlev           -         Image: Materiál	Grafy       Stabilita       Výstupy       ▶       Přídat obrázek       Nosníky :       0       Celkem :       0       ■       Szanam obrázků				
Nosnik         Umisténí           0         Nosnik         Umisténí           1         Ano         Volná linie č. 1         I           2         Ano         Volná linie č. 3         I           4         Ano         Volná linie č. 4         I	Uvažovat kontakt vlevo Typ kontaktu: Typ kontaktu: Uložení [m] Začátek Konec Uložení [m] Uvažovat vlastní tihu Uvažovat No (b) x 0,10 (h) m C 20/25 (není zadán) (není zadán)	Grafy Stabilita Výstupy – Přidat obrázek Nosniky : 0 Celkem : 0 E <sup>®</sup> Seznam obrázků E <sup>®</sup> Seznam obrázků E <sup>®</sup> Seznam obrázků				

Dialogové okno "Nové nosníky" – Fáze budování 2

Nyní provedeme výpočet a zobrazíme výsledky pro svislé geostatické napětí  $\sigma_{z,ef}$  [kPa], dále boční deformaci  $d_x$  [mm] a vnitřní síly na ostění raženého kolektoru.



Rám "Výpočet" – Fáze budování 2 (svislé geostatické napětí  $\sigma_{z,ef}$ )

Z obrázku plyne, že maximální vodorovná deformace je 2,2 mm (kolektor se chová jako tuhý celek). Pro lepší představu o chování konstrukce si zobrazíme deformovanou síť (tlačítko v horní části obrazovky).



Rám "Výpočet" – Fáze budování 2 (vodorovná deformace  $d_x$  po odtížení zeminy)

Poznámka: Jednotlivé aktuální pohledy na obrazovce lze také uložit jako samostatné a poté je i spravovat. Tímto se výrazně urychlí práce při zobrazení výsledků (více viz Help – F1).





Dialogové okno "Nový pohled"

Nyní si prohlédneme průběhy ohybových momentů M [kNm/m], posouvajících sil Q [kN/m] a normálových tlakových sil  $N^-$  [kN/m] pro 2. fázi budování (pomocí tlačítka "Nastavení" v záložce "Veličiny na nosnících").



Rám "Výpočet" – Fáze budování 2 (průběhy ohybových momentů M)

Poznámka: Některé výsledky z důvodů přehlednosti a srozumitelnosti nelze vykreslovat současně. Nelze například vykreslit deformovanou konstrukci a současně průběhy vnitřních sil na nosníku, vždy je nutné zvolit pouze jednu variantu. V případě, kdy jsou zadány nepřípustné kombinace výstupů, program na to upozorní v spodní části dialogového okna (více viz Help – F1).

Na tyto hodnoty lze v libovolném statickém programu (např. FIN EC – BETON 2D) navrhnout a posoudit výztuž ostění kolektoru. Výsledky zaznamenáme do souhrnné tabulky.



Rám "Výpočet" – Fáze budování 2 (průběhy posouvajících sil Q)



Rám "Výpočet" – Fáze budování 2 (průběhy normálových tlakových sil  $N^-$ )



#### Kontrola podmínky plasticity: Mohr-Coulombův materiálový model

Nyní ověříme, zda dochází ke vzniku plastických deformací pro nelineární modely či nikoliv. Vrátíme se do režimu "Topologie" a v rámu "Zeminy" změníme materiálový model na "Mohr-Coulomb".

Úprava vlastností zeminy X				
- Identifikace			- ? - Zobrazení	
Název : zemina č. 1	Modul odtížení / přitížení :	E <sub>ur</sub> = 12,00 [MPa]	Kategorie vzorků :	
	Úhel vnitřního tření :	φ <sub>ef</sub> = 21,00 [°]	GEO 👻	
— Materiálový model	— ? - Soudržnost zeminy :	c <sub>ef</sub> = 12,00 [kPa]	Hledat :	
Materiálový model : Mohr - Coulomb	Úhel dilatance :	ψ = 0,00 [°]	Podkategorie :	
Základní data	- <b>?</b> ·		Zeminy (1 - 10)	
Objemová tíha : γ = 20,00 [kN/m <sup>3</sup> ]			19/9/9/9/9/9/9/9/	
Modul pružnosti : E = 12,00 [MPa]			1 / 1 / 1 / 1 / 1 / 1 / 1 / 1 / 1 / 1 /	
Tuhost s hloubkou : konstantní 🔹			19191919191919191919191919191919191919	
			3 Hlína štěrkovitá	
Poissonovo číslo : v = 0,40 [-]			Barva :	
Vztlak	-?-		▼ Degad()	
Způsob výp.vztlaku : standardní 🔹			automatické 🗸 🗸	
Obj.tiha sat.zeminy : γ <sub>sat</sub> = 22,00 [kN/m <sup>3</sup> ]			Sytost <10 - 90> : 40 [%]	
Zatřiď Vymaž			V OK Storno	

#### Úprava vlastností zeminy



Po provedení výpočtů si prohlédneme ekvivalentní plastické deformace.

Rám "Výpočet" – Fáze budování 2 (ekvivalentní deformace  $\varepsilon_{eq.,pl.}$  podle MC modelu)

Z předchozího obrázku vyplývá, že podmínka plasticity pro Mohr-Coulombův model není překročena – ekvivalentní plastické deformace  $\varepsilon_{eq,,pl.}$  jsou nulové, což odpovídá chování konstrukce podle elastického materiálového modelu. Výsledné hodnoty deformací, geostatického napětí a vnitřních sil jsou tudíž shodné.

#### Vyhodnocení výsledků

V následující tabulce jsou zobrazeny hodnoty extrémů vnitřních sil na nosnících (ostění kolektoru) pro 2. fázi budování. Jedná se o hodnoty ohybových momentů, posouvajících a normálových sil. Tento výpočet jsme provedli pro elastický materiálový model s lokálním zahuštěním trojúhelníkových prvků.

Materiálový	Fáze budování 2			
model	$N^{-}[kN/m]$	<i>M</i> [ <i>kNm/m</i> ]	Q [kN/m]	
Elastický	- 160,2	+ 61,8	+ 202,5	
	- 214,7	- 61,8	- 201,3	

Průběhy vnitřních sil na nosnících (extrémy) – Fáze budování 2

#### Závěr

Z výsledků numerického výpočtu lze vyvodit následující závěry:

- Lokální zahuštění sítě konečných prvků vede k přesnějším výsledkům.
- Pokud u nelineárních materiálových modelů (např. Mohr-Coulomb) vycházejí ekvivalentní plastické deformace \varepsilon\_{eq.,pl.} nulové, pak se konstrukce chová elasticky a výsledky vnitřních sil, deformací a napětí jsou pro oba typy modelů stejné.

Poznámka: Výpočet, který jsme provedli, ve skutečnosti vychází z nereálného předpokladu, že ostění působí zároveň s odtěžením zeminy. Tento způsob by byl vhodný pro konstrukce budované protlačením v měkkých zeminách (zatlačení hotové konstrukce do zeminy). Ve skutečnosti při odtěžení zeminy dojde k odlehčení masivu a deformaci zeminy, resp. horniny směrem do výrubu. Reálný příklad modelování tunelu je popsán v kapitole 26. Numerické modelování tunelu metodou NRTM.

Pokud by v našem příkladě nebylo ostění aktivováno hned (lze modelovat jako další fázi budování bez zadání nosníkových prvků), došlo by k zavalení výrubu – pro elastický model je toto znázorněno velkými deformacemi, u nelineárního modelu pak program nenajde řešení.



Výpočet bez použití nosníkových prvků (sednutí  $d_z$  podle elastického modelu)



Dialogové okno "Chyba" – výpočet bez použití nosníkových prvků (podle MC modelu)